

附赠1DVD光盘

ANSYS 14.5 Workbench 机械仿真实例详解

刘江 等编著

基础够用，实例丰富，讲解透彻，提升迅速

赠送视频操作演示，轻松学习

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

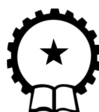


VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

ANSYS 14.5 Workbench
机械仿真实例详解

刘　江　等编著



机 械 工 业 出 版 社

本书基于 ANSYS 14.5 Workbench 环境平台，通过大量典型实例，深入浅出地介绍了 ANSYS Workbench 机械仿真技术和实际应用。全书包括两部分共 12 章，第 1～4 章为 ANSYS 14.5 Workbench 基础技术，分别介绍了 ANSYS 14.5 实体建模技术、建立有限元模型、求解、结果数据的处理。第 5～12 章为典型实例，从专业的角度，本着循序渐进、由浅入深的原则，分别介绍了 Workbench 结构静力学分析实例、结构动力学分析实例、疲劳分析实例、结构非线性分析实例、屈曲分析实例、刚体动力学分析实例、结构热分析实例以及结构优化分析实例。这些实例全部来自于工程项目，代表性和实践性强，无论读者之前是否有基础，通过学习都可以实现入门和提高，并达到熟练应用的程度。

本书含光盘一张，包括书中所有实例素材文件和视频操作演示，方便读者使用。本书适合机械仿真人员使用，同时也可作为高校相关专业学生的教材，是读者学习 ANSYS Workbench 仿真的必备宝典。

图书在版编目（CIP）数据

ANSYS 14.5 Workbench 机械仿真实例详解/刘江等编著. —北京：机械工业出版社，2014.12（2016. 8重印）
ISBN 978-7-111-48820-0

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①刘… Ⅲ. ①机械设计—计算机仿真—有限元分析—应用软件 Ⅳ. ①TH122-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 290207 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：周国萍 责任编辑：周国萍 吴超莉
版式设计：霍永明 责任校对：路清双
封面设计：马精明 责任印制：李 洋
北京宝昌彩色印刷有限公司印刷
2016 年 8 月第 1 版 · 第 2 次印刷
184mm×260mm · 26.5 印张 · 647 千字
3001—4000册
标准书号：ISBN 978-7-111-48820-0
ISBN 978-7-89405-666-5（光盘）
定价：69. 00 元（含 1DVD）

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
编 辑 热 线 ：010-88379733

网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　　言

ANSYS 是美国ANSYS 开发的融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。它能与多数 CAD软件接口实现数据的共享和交换，是现代产品设计中的高级 CAE 工具之一。Workbench 是 ANSYS 协同仿真环境的平台，它提供软件的组件（API）。用户可以根据本企业产品研发流程，将这些拆散的技术重新组合，并集成为具有自主知识产权的技术，形成既能够充分满足自身的分析需求，又融入产品研发流程的仿真体系。具有客户化、集成化、参数化等特点，应用越来越普遍。因此，出版 ANSYS Workbench 应用类教程很有必要。

为了保证本书的实用性，本书以最新的 ANSYS 14.5 为写作平台，以应用为纲，通过大量实例来讲解 ANSYS Workbench 机械仿真分析的原理、方法和操作事项。本书共包括 12 章，具体内容如下。

第 1 章为 ANSYS 14.5 Workbench 概述，简要介绍了 ANSYS Workbench 功能特点、系统配置、工作界面以及分析过程。读者通过学习，将对 ANSYS Workbench 有一个入门性的了解。

第 2 章介绍了 ANSYS 实体建模技术，包括二维草图绘制、基础实体建模、高级实体建模、建模编辑工具、线面建模以及实体建模综合实例。读者通过学习，将对 ANSYS 实体建模技术有所熟悉和掌握。

第 3 章介绍了如何建立有限元模型，包括单元类型选择、属性设置、施加载荷和约束、划分网格、模型质量检查和修正以及建立有限元模型实例。读者学习时，应重点掌握属性设置和网格划分的方法。

第 4 章首先介绍了求解技术，包括设置求解控制项、Workbench 环境直接求解、导入 ANSYS 环境求解。读者学习时，可以比较两者的区别。然后讲解了结果数据的处理，包括基本操作和使用技巧。

第 5～12 章为 ANSYS 14.5 Workbench 应用实例，通过 22 个实例，详细介绍了 Workbench 结构静力学分析、结构动力学分析、疲劳分析、结构非线性分析、屈曲分析、刚体动力学分析、结构热分析以及优化分析的流程、方法和技巧。实例典型丰富，由浅入深，涉及面广，全部来自于工程项目，代表性和实践性强。读者学习后可以快速实现入门和提高，并达到熟练应用的程度。

本书含光盘一张，包括书中所有实例素材文件和视频操作演示，方便读者使用。本书适合机械仿真分析人员使用，同时也可作为高校相关专业学生的教材。

本书由刘江、李万全、高长银、刘丽、黎胜容、黎双玉、邱大伟、马龙梅、涂志涛、刘红霞、刘铁军、何文斌、邓力、王乐、杨学围、张秋冬、闫延超、董延、郭志强、毕晓勤、贺红霞、史丽萍、袁丽娟、刘汝芳、夏劲松编写。

由于时间有限，书中难免会有一些错误和不足之处，欢迎广大读者及业内人士批评指正。

编著者

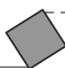
目　　录

前言

第 1 部分　ANSYS 14.5 Workbench 基础技术

第 1 章　ANSYS 14.5 Workbench 入门概述 ···· 1
1.1　ANSYS 14.5 Workbench 概述 ···· 1
1.1.1　ANSYS 14.5 Workbench 的特点 ···· 2
1.1.2　ANSYS 14.5 Workbench 的功能 ···· 3
1.2　ANSYS 14.5 Workbench 用户操作界面 ···· 4
1.2.1　启动 ANSYS Workbench ···· 4
1.2.2　ANSYS Workbench 用户界面 ···· 4
1.3　ANSYS Workbench 项目管理 ···· 12
1.3.1　分析项目组成 ···· 12
1.3.2　创建分析项目 ···· 12
1.3.3　删除分析项目 ···· 13
1.3.4　复制项目 ···· 13
1.3.5　项目关联与链接 ···· 14
1.4　ANSYS 14.5 Workbench 分析的基本过程 ···· 14
1.5　本章小结 ···· 15
第 2 章　ANSYS 14.5 Workbench 建立分析模型 ···· 16
2.1　DesignModeler 概述 ···· 16
2.1.1　DesignModeler 模块的特点 ···· 16
2.1.2　DesignModeler 用户界面 ···· 17
2.1.3　鼠标选择操作 ···· 21
2.2　二维草图绘制 ···· 22
2.2.1　二维草图简介 ···· 22
2.2.2　创建新平面 ···· 22
2.2.3　创建新草图 ···· 25
2.2.4　创建草图元素——Draw ···· 26
2.2.5　编辑草图元素——Modify ···· 32
2.2.6　标注草图尺寸——Dimension ···· 37
2.2.7　草图几何约束——Constraints ···· 38
2.2.8　草图设置——Settings ···· 39
2.3　实体特征建模 ···· 39
2.3.1　基础实体建模 ···· 40
2.3.2　拉伸特征——Extrude ···· 43
2.3.3　旋转特征——Revolve ···· 45
2.3.4　扫描特征——Sweep ···· 45
2.3.5　放样特征——Skin/Loft ···· 45
2.4　实体特征编辑和操作 ···· 46
2.4.1　抽壳——Thin/Surface ···· 46
2.4.2　倒圆角特征 ···· 46
2.4.3　倒角特征——Chamfer ···· 47
2.4.4　阵列特征——Pattern ···· 48
2.4.5　体操作特征——Body Operation ···· 48
2.4.6　布尔运算——Boolean ···· 49
2.4.7　切片特征——Slice ···· 49
2.4.8　面删除——Face Delete ···· 49
2.4.9　边删除——Edge Delete ···· 50
2.5　实体建模工具 ···· 50
2.5.1　激活和冻结体——Unfreeze 和 Freeze ···· 50
2.5.2　抑制体和取消——Suppress Body 和 Unsuppress Body ···· 51
2.5.3　命名选择——Named Selection ···· 51
2.5.4　中面——Mid-Surface ···· 51
2.5.5　包围——Enclosure ···· 52
2.5.6　对称——Symmetry ···· 52
2.5.7　填充——Fill ···· 53
2.5.8　组合单体零件——Form New Part ···· 53
2.6　概念建模 ···· 54
2.6.1　创建线体 ···· 54

2.6.2 定义截面——Cross Section ……56
2.6.3 绘制面体 ……57
2.7 参数化建模 ……59
2.7.1 提取参数 ……59
2.7.2 参数管理器 ……60
2.8 CAD 数据导入 Workbench……61
2.8.1 ANSYS Workbench 与 SolidWorks 集成设置 ……61
2.8.2 直接读取模式 ……63
2.8.3 双向关联模式 ……64
2.9 本章小结 ……64
第 3 章 ANSYS 14.5 Workbench 建立有限元模型 ……65
3.1 设置材料属性 ……65
3.1.1 进入 Engineering Data 应用程序 ……65
3.1.2 工程数据源和材料库 ……66
3.1.3 添加现有材料 ……68
3.1.4 添加新材料库及材料属性 ……70
3.2 有限元网格概述 ……72
3.2.1 Workbench 网格划分界面——Meshing 界面 ……72
3.2.2 网格类型 ……78
3.3 全局网格控制 ……79
3.3.1 网格分析类型 ……79
3.3.2 相关性和关联中心——Relevance 和 Relevance Center……81
3.3.3 全局单元尺寸——Element Size……82
3.3.4 初始尺寸种子——Initial Size Seed……83
3.3.5 平滑和过渡——Smoothing 和 Transition ……83
3.3.6 跨度中心角——Span Angle Center……85
3.3.7 高级尺寸功能——Use Advanced Size Function……85
3.3.8 膨胀层——Inflation……87
3.3.9 三角曲面划分器选项——Patch Conforming……88
3.3.10 网格高级选项——Advanced…88
3.3.11 网格损伤设置——Defeaturing ‥ 89
3.3.12 网格评估统计——Statistics… 89
3.4 局部网格控制 …… 94
3.4.1 启动局部网格控制命令 …… 94
3.4.2 局部尺寸——Sizing …… 95
3.4.3 接触尺寸——Contact Sizing…… 97
3.4.4 细化——Refinement…… 97
3.4.5 映射面划分——Mapped Face Meshing …… 98
3.4.6 匹配控制——Match Control …… 99
3.4.7 收缩控制——Pinch …… 100
3.4.8 膨胀——Inflation…… 100
3.5 网格划分方法 …… 102
3.5.1 网格划分方法简介 …… 102
3.5.2 自动划分方法——Automatic‥ 103
3.5.3 四面体方法——Tetrahedrons‥ 104
3.5.4 六面体方法——Hex Dominant …… 105
3.5.5 扫掠方法——Sweep…… 105
3.5.6 多区域——MultiZone …… 107
3.6 网格工具 …… 109
3.6.1 生成和预览网格 ……110
3.6.2 剖面 ……110
3.6.3 命名选项 ……112
3.7 本章小结 ……112
第 4 章 ANSYS 14.5 Workbench 求解和后处理 ……113
4.1 Mechanical 简介……113
4.2 Mechanical 用户界面……113
4.2.1 启动 Mechanical ……113
4.2.2 Mechanical 界面 ……114
4.2.3 鼠标控制 ……117
4.3 Mechanical 基本操作……118
4.4 模型求解 …… 122
4.4.1 设置求解器 …… 122
4.4.2 Workbench 环境直接求解…… 123

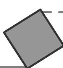


4.4.3 导入 ANSYS 经典环境求解 ····123
4.5 结果数据后处理 ······125
4.5.1 变形显示 ······125
4.5.2 应力和应变 ······126
4.5.3 工具 ······127
4.5.4 图形显示结果 ······129
4.5.5 动画显示结果 ······132
4.6 本章小结 ······132

第 2 部分 ANSYS 14.5 Workbench 应用实例

第 5 章 ANSYS 14.5 Workbench 结构静力学分析实例 ······133
5.1 结构静力学分析概述 ······133
5.1.1 线性结构静力分析基础 ······133
5.1.2 工程数据和几何模型 ······134
5.1.3 构造几何 ······136
5.1.4 分析设置 ······137
5.1.5 载荷和约束 ······139
5.2 实例 1——薄板平面受力结构分析 ·····148
5.2.1 实例说明 ······148
5.2.2 分析思路 ······149
5.2.3 具体分析过程 ······149
5.2.4 实例总结 ······157
5.3 实例 2——托架体的结构分析 ······157
5.3.1 实例说明 ······157
5.3.2 分析思路 ······157
5.3.3 具体分析过程 ······158
5.3.4 实例总结 ······168
5.4 实例 3——拉杆式桁架的结构分析 ·····169
5.4.1 实例说明 ······169
5.4.2 分析思路 ······169
5.4.3 具体分析过程 ······169
5.4.4 实例总结 ······176
5.5 本章小结 ······177
第 6 章 ANSYS 14.5 Workbench 结构动力学分析实例 ······178
6.1 结构动力学分析概述 ······178
6.1.1 结构动力学简介 ······178
6.1.2 模态分析基础知识 ······179
6.1.3 谐响应分析基础知识 ······181
6.1.4 响应谱分析基础知识 ······186
6.2 实例 1——轴和轴承座模态分析 ······189
6.2.1 实例说明 ······189
6.2.2 分析思路 ······189
6.2.3 具体分析过程 ······189
6.2.4 实例总结 ······197
6.3 实例 2——压榨机架的谐响应分析 ···· 197
6.3.1 实例说明 ······197
6.3.2 分析思路 ······197
6.3.3 具体分析过程 ······197
6.3.4 实例总结 ······207
6.4 实例 3——桁架的响应谱分析 ······207
6.4.1 实例说明 ······207
6.4.2 分析思路 ······207
6.4.3 具体分析过程 ······207
6.4.4 实例总结 ······214
6.5 本章小结 ······214
第 7 章 ANSYS 14.5 Workbench 疲劳分析实例 ······215
7.1 疲劳分析概述 ······215
7.1.1 疲劳分析基础 ······215
7.1.2 疲劳分析术语 ······216
7.1.3 疲劳工具 ······218
7.2 实例 1——篮圈的疲劳分析 ······219
7.2.1 实例说明 ······219
7.2.2 分析思路 ······220
7.2.3 具体分析过程 ······220
7.2.4 实例总结 ······230
7.3 实例 2——轴零件的疲劳分析 ······231
7.3.1 实例说明 ······231
7.3.2 分析思路 ······231
7.3.3 具体分析过程 ······231
7.3.4 实例总结 ······244
7.4 本章小结 ······244

第 8 章 ANSYS 14.5 Workbench 结构非线性分析实例 ······245
8.1 结构非线性分析概述 ······245
8.1.1 结构非线性分析简介 ······245
8.1.2 结构非线性分类 ······246
8.1.3 接触分析简介 ······247
8.2 实例 1——夹钳大变形分析 ······253
8.2.1 实例说明 ······253
8.2.2 分析思路 ······254
8.2.3 具体分析过程 ······254
8.2.4 实例总结 ······263
8.3 实例 2——套杆静态接触分析 ······264
8.3.1 实例说明 ······264
8.3.2 分析思路 ······264
8.3.3 具体分析过程 ······264
8.3.4 实例总结 ······271
8.4 实例 3——轴盘动态接触分析 ······271
8.4.1 实例说明 ······271
8.4.2 分析思路 ······272
8.4.3 具体分析过程 ······272
8.4.4 实例总结 ······280
8.5 本章小结 ······280
第 9 章 ANSYS 14.5 Workbench 屈曲分析实例 ······281
9.1 屈曲分析概述 ······281
9.1.1 屈曲分析基础 ······281
9.1.2 屈曲分析类型 ······282
9.2 实例 1——风扇罩线性屈曲分析 ······283
9.2.1 实例说明 ······283
9.2.2 分析思路 ······283
9.2.3 具体分析过程 ······283
9.2.4 实例总结 ······290
9.3 实例 2——工字梁非线性屈曲分析 ······290
9.3.1 实例说明 ······290
9.3.2 分析思路 ······290
9.3.3 具体分析过程 ······290
9.3.4 实例总结 ······299
9.4 本章小结 ······299
第 10 章 ANSYS 14.5 Workbench 刚体动力学分析实例 ······300
10.1 刚体动力学分析概述 ······300
10.1.1 刚体动力学分析基础 ······300
10.1.2 定义连接 ······301
10.1.3 载荷和约束 ······304
10.1.4 分析设置 ······305
10.2 实例 1——连杆机构运动分析 ······306
10.2.1 实例说明 ······306
10.2.2 分析思路 ······306
10.2.3 具体分析过程 ······306
10.2.4 实例总结 ······314
10.3 实例 2——压气机动力学分析 ······315
10.3.1 实例说明 ······315
10.3.2 分析思路 ······315
10.3.3 具体分析过程 ······315
10.3.4 实例总结 ······327
10.4 实例 3——门机构运动分析 ······327
10.4.1 实例说明 ······327
10.4.2 分析思路 ······328
10.4.3 具体分析过程 ······328
10.4.4 实例总结 ······338
10.5 本章小结 ······338
第 11 章 ANSYS 14.5 Workbench 结构热分析实例 ······339
11.1 结构热分析概述 ······339
11.1.1 传热方式 ······339
11.1.2 热分析类型 ······341
11.1.3 热分析中的接触 ······343
11.1.4 热分析中的载荷和边界条件 ······345
11.2 实例 1——芯片稳态热分析 ······347
11.2.1 实例说明 ······347
11.2.2 分析思路 ······347
11.2.3 具体分析过程 ······348
11.2.4 实例总结 ······358
11.3 实例 2——芯片瞬态传热分析 ······358
11.3.1 实例说明 ······358
11.3.2 分析思路 ······358



11.3.3 具体分析过程 ……359
11.3.4 实例总结 ……363
11.4 实例 3——齿轮淬火瞬态热分析 ……363
11.4.1 实例说明 ……363
11.4.2 分析思路 ……363
11.4.3 具体分析过程 ……364
11.4.4 实例总结 ……374
11.5 本章小结 ……374
第 12 章 ANSYS 14.5 Workbench 结构优化分析实例 ……375
12.1 优化设计概述 ……375
12.1.1 优化设计类型 ……375
12.1.2 Design Exploration 简介 ……376
12.2 实例 1——夹钳拓扑优化分析 ……377
12.2.1 实例说明 ……377
12.2.2 分析思路 ……377
12.2.3 具体分析过程 ……378
12.2.4 实例总结 ……383
12.3 实例 2——连接片结构优化分析 ……383
12.3.1 实例说明 ……383
12.3.2 分析思路 ……384
12.3.3 具体分析过程 ……384
12.3.4 实例总结 ……397
12.4 实例 3——散热器响应曲面优化分析 ……397
12.4.1 实例说明 ……397
12.4.2 分析思路 ……398
12.4.3 具体分析过程 ……398
12.4.4 实例总结 ……414
12.5 本章小结 ……414
参考文献 ……415

第 1 部分

ANSYS 14.5 Workbench 基础技术



第 1 章　ANSYS 14.5 Workbench 入门概述

ANSYS Workbench 结合了 ANSYS 核心产品求解器，采用项目管理方式分析项目流程管理，以图表流程的方式构造分析系统，具有简单易用的耦合场分析功能。因此，随着功能的不断完善和强大，Workbench 逐渐被工程界接受，进而普遍应用。本章将对 ANSYS Workbench 软件的功能模块、用户界面、项目管理和分析流程等进行详细讲解。

1.1　ANSYS 14.5 Workbench 概述

ANSYS 14.5 Workbench 是 ANSYS 公司出品的新一代仿真平台，较以往版本，除在功能上作了较大扩展外，在操作界面和易学、易用方面还发生了革命性变化。

1997 年，ANSYS 公司基于广大设计者的分析应用需求，开发了专供设计人员应用的分析软件 ANSYS Design Space，其前后处理功能与经典的 ANSYS 软件完全不同，软件的易用性和 CAD 软件的接口特性非常优良。

2000 年，ANSYS Design Space 的界面风格更加深受广大用户喜爱。ANSYS 公司决定提升 ANSYS Design Space 的界面风格，以使经典的 ANSYS 软件的前后处理功能也能应用，由此形成了系统仿真环境——ANSYS Workbench Environment（AWE）。

2001 年，在 AWE 上开发了 ANSYS DesignModeler（DM）、ANSYS DesignXplorer（DX）、ANSYS DesignXplorer VT（DX VT）、ANSY Fatigue Module（FM）、ANSYS CAE Template 等，目的是和 DS 共同提供给用户先进的 CAE 技术。

2009 年，ANSYS 公司发布了 ANSYS 12.0 Workbench 版本；2010 年，ANSYS 公司发布了 ANSYS 13.0 Workbench 版本；2012 年 11 月 13 日，ANSYS 公司发布以全面的 ANSYS 高级多物理场工程仿真技术为基础的 14.5 版软件产品，并将最新的多物理场功能无缝地集成到 ANSYS Workbench 平台中，能实现很好的设计工作效率和创新性，为进一步设计探索和完整虚拟原型的创建工作带来一体化最优方案。

1.1.1 ANSYS 14.5 Workbench 的特点

1）利用项目视图功能将整个仿真流程紧密结合起来，使得用户完成复杂仿真的过程变得简单容易。用户可选择软件设置好的分析项目流程，也可用软件提供的模块组装自己的分析项目流程。软件提供了一个项目流程图，用户按照顺序执行任务就能很容易地完成分析项目，通过项目流程图还可以很方便地了解数据关系、分析过程状态。Workbench 可以被看做一个平台，能自动管理项目所使用的数据和应用程序。

2）与 CAD 和 FEA 求解器的协同仿真。ANSYS Workbench 集设计、仿真、优化、网格变形等功能于一体，对各种数据进行协同管理，如图 1-1 所示。

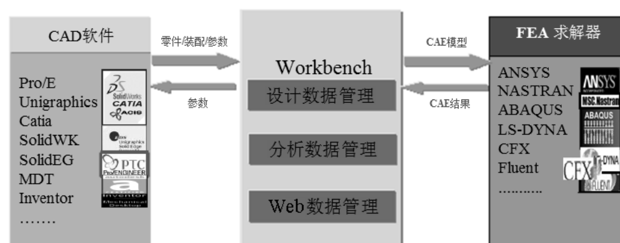


图 1-1 CAD 设计—CAE 仿真协同流程

3）具有与 CAD 软件的双向参数链接。最新的 ANSYS Workbench 可与 CAD 系统中的实体及曲面模型双向链接，具有更高的 CAD 几何导入成功率。当 CAD 模型发生变化时，不用对所施加的负载和约束重新定义。

4）强大的装配体自动分析功能。针对航空、汽车、电子产品结构复杂，零部件众多的技术特点，Workbench 可识别相邻的零件并自动设置接触关系，从而可节省模型建立的时间。而现行的许多软件均需要手工设置接触关系，这不但费时间同时还容易出错，除此之外，Workbench 还提供了许多工具，以方便手动编辑接触表面或为现有的接触指定接触类型。

5）具有先进的网格处理功能，可对复杂的几何实体进行高质量的网格划分，划分结果可提供给不同类型的仿真过程使用。

许多 CAE 用户都花费大量的时间建立模型网格，Workbench 在大型复杂部件，如飞机组装配件的网格建立上独具特色，自动网格生成技术可大大节省用户的时间。传统的专业分析人员会花大量的时间和训练来掌握各种分析，手动处理模型以保证分析的精度，而对于设计人员来说，他所关注的应该是自己的产品设计，而不是有限元方法，因此需要一个可靠的工具来替代传统的工具，尽可能实现自动化。

6）协同的多物理场分析环境和行业化定制功能。CAE 技术涵盖了计算结构力学、计算流体力学、计算电磁学等诸多学科专业，而航空产品的设计对这几个学科专业都有强烈的 CAE 需求。单个 CAE 软件通常只能解决某个学科专业问题，导致使用者需要购买一系列由不同公司开发的、具有不同应用领域的软件，并将其组合起来解决世界工程问题，这不但增加了软件投资，而且很多问题会由于不同软件间无法有效而准确地传递数据而根本不能实现真正的耦合分析。Workbench 提供了完备的多物理场分析功能。

1.1.2 ANSYS 14.5 Workbench 的功能

ANSYS 14.5 Workbench 用来模拟多物理场环境的实际工程问题，可实现的数值模拟技术如下：

1．结构静力学分析

结构静力学分析用来求解外载荷引起的位移、应力和约束反力。结构静力学分析很适合求解惯性和阻尼对结构的影响并不显著的问题。结构静力学分析不仅可以进行线性分析，而且可以进行非线性分析，结构非线性导致结构或部件的响应随外载荷不成比例变化。可求解静态非线性问题，包括材料非线性，如塑性、大应变；几何非线性，如膨胀、大变形；单元非线性，如接触分析等。

2．结构动力学分析

结构动力学分析用来求解随时间变化的载荷对结构或部件的影响。与静力学不同，动力学分析考虑随时间变化的载荷以及它对阻尼和惯性的影响。动力学分析可分析大型三维柔体和刚体运动。当运动的积累影响起主要作用时，可使用这些功能分析复杂结构在空间的运动特性，并确定结构中由此产生的应力、应变和变形。结构动力学分析包括模态分析、谐响应分析、响应谱分析、随机振动响应分析、瞬态动力学分析等。

3．刚体动力学分析

刚体动力学是研究刚体在外力作用下的运动规律。它是机器部件的运动，舰船、飞机、火箭等航行器的运动以及天体姿态运动的力学基础。Workbench 直接以参数化方式导入复杂的 CAD 运动装配模型，提供了完整的运动副类型来自动定义构件的运动关系，并提供了丰富的载荷库，以此来创建完全参数化的机械系统动力学计算模型。在求解算法上，Rigid Dynamics 采用了无须迭代计算和收敛检查的显示积分技术，并提供了自动时间步功能来快速求解复杂系统的动力学特性，输入位移、速度、加速度和反作用力等历程曲线。

4．结构热分析

结构热分析可处理热传递的 3 种基本类型——传导、对流和辐射。热传递的 3 种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析。结构热分析应用于热处理问题、电子封装、发动机组、压力容器、流固耦合问题、热结构耦合的热应力问题等。

5．流体动力学分析

ANSYS Workbench 流体动力学包括 CFX 和 Fluent，分析类型可以为瞬态或稳态。分析结果可以是每个节点的压力和通过每个单元的流速，并且可以利用后处理功能产生压力、流速和温度分布的图形显示。此外也提供专业流体分析系统，如模流分析 Polyflow、水动力学分析 Hydrodynamic、电子设计中的传热和流体流动模拟 Icepak。

6．电磁场分析

电磁场问题的分析，包括电感、电容、磁通量密度、涡流、电场分布、磁场分布、力、运动效应、电路和能量损失等。电磁场分析可用于螺线管、变压器、发电机等设计和分析领域，Workbench 的分析系统包括电场、静磁场和热电分析等。

7．耦合场分析

通过直接耦合或载荷传递顺序耦合求解不同场的交互作用，用于分析如流体-结构耦合、

结构-热耦合、热电耦合等问题，Workbench 中可使用直接耦合分析系统进行直接耦合分析，使用不同分析系统的组合进行间接耦合分析。

8．优化分析

ANSYS DesignXplorer 具有功能强大且方便易用的多目标优化模块，优化参数可以是 CAD 模型的几何参数、结构形式、施加的边界条件、求解得到的分析结果等，也可以是由这些参数数学运算后派生出来的参数，既可以进行连续性参数和离散化参数的优化，也可以进行单目标/多目标的优化，得到设计空间的三维设计相应面/二维设计曲线，并自动根据优化结果更新几何模型文件。

1.2 ANSYS 14.5 Workbench 用户操作界面

应用 ANSYS Workbench 软件首先进入用户操作界面，可根据习惯选择用户界面的语言和操作界面设置。下面分别加以介绍。

1.2.1 启动 ANSYS Workbench

ANSYS Workbench 的启动有两种方法：开始菜单启动和 CAD 软件启动。

1．【开始】菜单启动

双击桌面上的【Workbench 14.5】图标，或选择开始菜单中的【ANSYS 14.5】|【Workbench 14.5】命令，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面，如图 1-2 所示。

2．CAD 软件启动

ANSYS Workbench 在安装时自动嵌入到其他 CAD 系统中（如 Pro/Engineer、Solidworks、UG、Creo 等），此时可选择 CAD 界面中的【ANSYS 14.5】|【ANSYS Workbench】命令，直接进入用户操作界面，如图 1-3 所示。



图 1-2 【开始】菜单启动



图 1-3 CAD 软件启动

1.2.2 ANSYS Workbench 用户界面

启动 ANSYS Workbench 并创建分析项目后，出现 ANSYS 14.5 Workbench 用户界面，包

括菜单栏、工具栏、工具箱、项目管理区、信息窗口、状态栏，如图 1-4 所示。

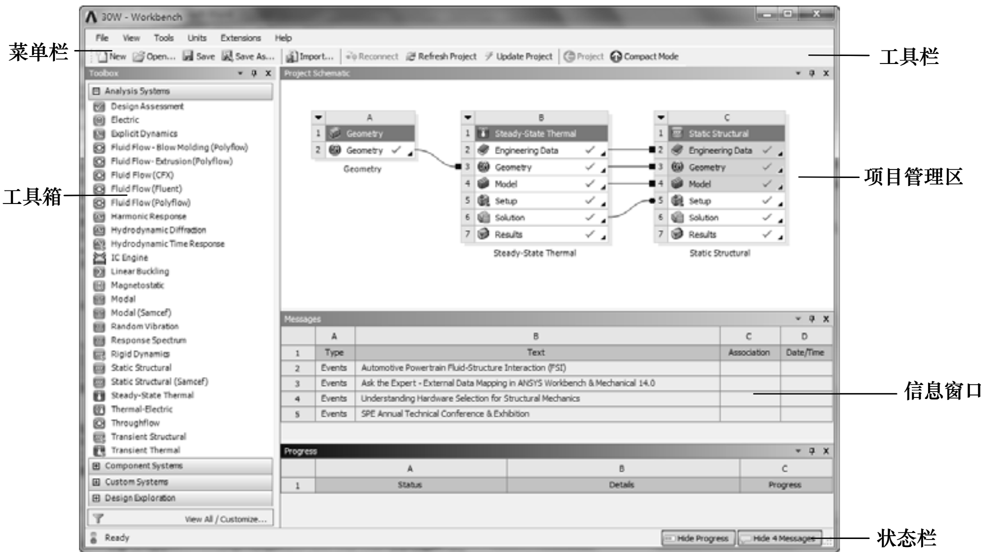


图 1-4　ANSYS 14.5 Workbench 用户界面

1．菜单栏

ANSYS 14.5 Workbench 界面中常用的菜单有【File】菜单、【Views】菜单、【Tools】菜单、【Units】菜单、【Extensions】菜单和【Help】菜单。下面只介绍主要菜单命令。

（1）【File】菜单　【File】菜单用于进行文件操作，如图 1-5 所示。



图 1-5　【File】菜单

（2）【View】菜单 【View】菜单中包括对工程项目可视化操作的命令，如图 1-6 所示。



图 1-6 【View】菜单

【View】菜单主要命令如下：

✧ Compact Mode（简洁模式）：选择该命令，ANSYS 14.5 Workbench 会压缩为一个小图标 30W - Workbench 置于操作系统桌面上，同时任务栏上的图标将消失。如果将鼠标移动到 30W - Workbench 图标上，Workbench 平台变成简洁模式，如图 1-7 所示。

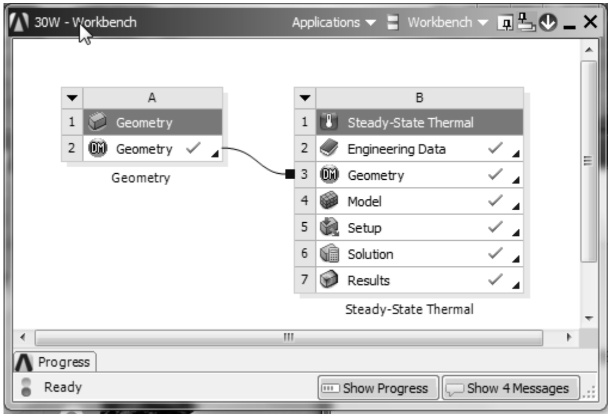


图 1-7 简洁模式

✧ Reset Workspace（复原操作平台）：将 ANSYS 14.5 Workbench 平台复原到初始状态，如图 1-8 所示。

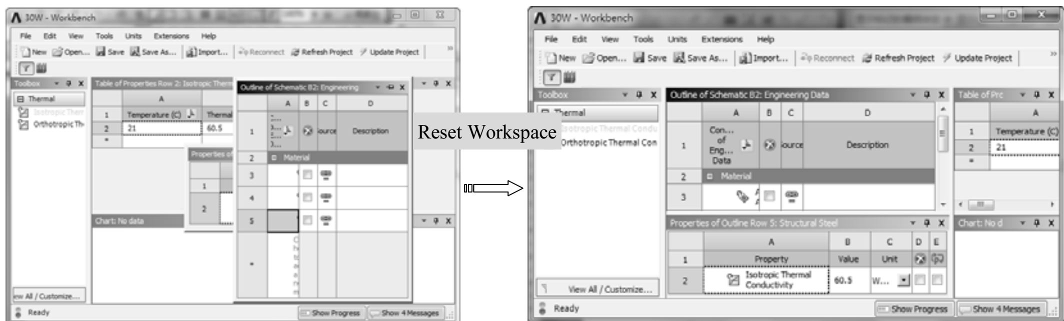


图 1-8　Reset Workspace（复原操作平台）

✧ Reset Window Layout（复原窗口布局）：将 ANSYS 14.5 Workbench 平台窗口布局复原到初始状态，如图 1-9 所示。

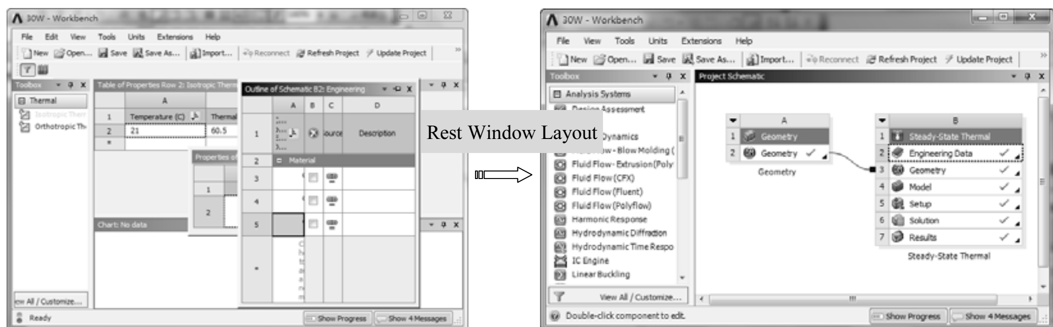


图 1-9　Reset Window Layout（复原窗口布局）

（3）【Tools】菜单　【Tools】菜单中包括对工程项目管理和定义操作的命令，如图 1-10 所示。

Reconnect —— 再次链接注册信息
Refresh Project —— 刷新工程数据
Update Project —— 更新工程数据（更新所有数据（网格、载荷、求解、结果））
License Preferences... —— 参考注册文件
Release Reserved Licenses... —— 释放保存的注册文件
Launch Remote Solve Manager... —— 加载远程求解器管理
Options... —— 选项

图 1-10　【Tools】菜单

选择【Tools】|【Options】命令，弹出【Options】对话框。该对话框包括以下选项卡：

✧ 【Project Management】选项卡：用于设置 Workbench 启动的默认目录和临时文件位置、是否启动【导读】对话框及是否加载新闻信息等，如图 1-11 所示。

✧ 【Appearance】选项卡：用于设置软件的背景颜色、文字、几何图形边等，如图 1-12 所示。

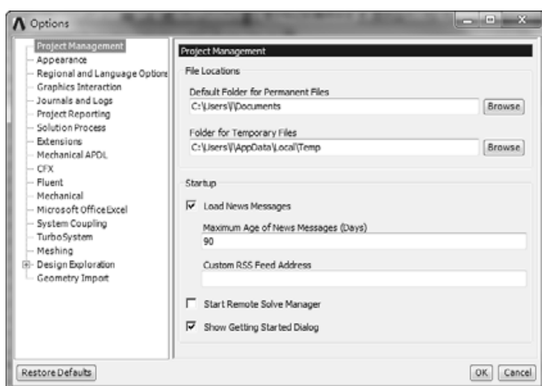


图 1-11 【Project Management】选项卡

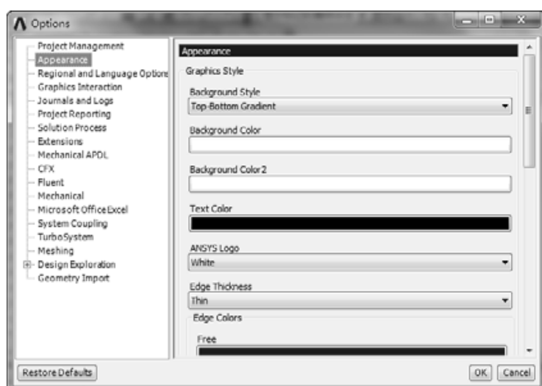


图 1-12 【Appearance】选项卡

✧ 【Regional and Language Options】选项卡：用于设置软件语言，如图 1-13 所示。

✧ 【Graphics Interaction】选项卡：用于设置鼠标对图形的操作，如平移、旋转、放大、缩小等，如图 1-14 所示。

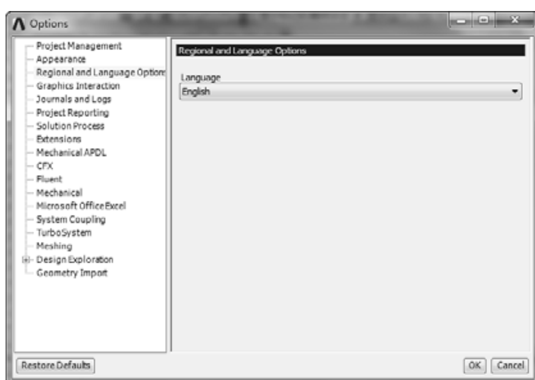


图 1-13 【Regional and Language Options】选项卡

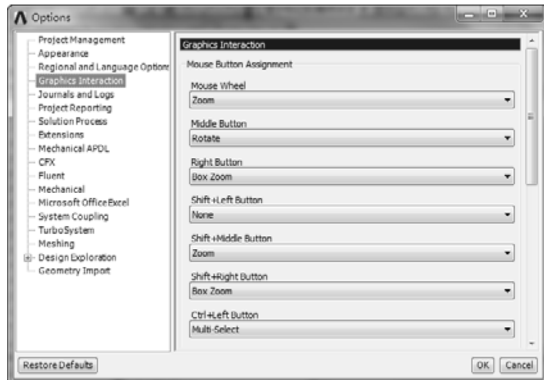


图 1-14 【Graphics Interaction】选项卡

（4）【Units】菜单 【Units】菜单用于设置工程分析单位，包括对工程项目管理和定义操作的命令，如图 1-15 所示。

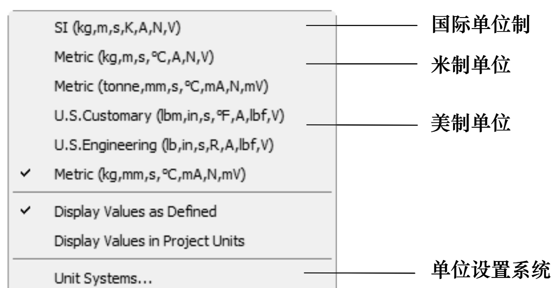


图 1-15 【Units】菜单

2．工具栏

利用 Meshing 界面中的工具栏命令按钮启动命令是最方便的方法，如图 1-16 所示。



图 1-16　工具栏

3．工具箱

工具箱（Toolbox）位于 ANSYS 14.5 Workbench 窗口左侧，列出了可使用的系统和应用程序。通过工具箱可将应用程序和系统添加到项目管理中，工具箱有 4 类分析模块，如图 1-17 所示。

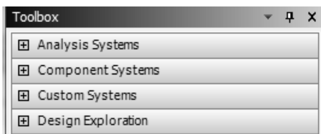


图 1-17　工具箱

（1）Analysis Systems（分析系统）　Analysis Systems（分析系统）主要用于预定义的分析类型，包括静力分析、热分析、流体分析、热力学分析，同时模块中也包括不同种求解器求解相同的分析类型，例如结构静力分析包括 ANSYS 求解器的 Static Structural 和 Samcef 求解器的 Static Structural（Samcef），如图 1-18 所示。



图 1-18　Analysis Systems（分析系统）

（2）Component Systems（组件系统） Component Systems（组件系统）用于用户自定义各种领域的几何建模工具和不同分析系统扩展，如图 1-19 所示。

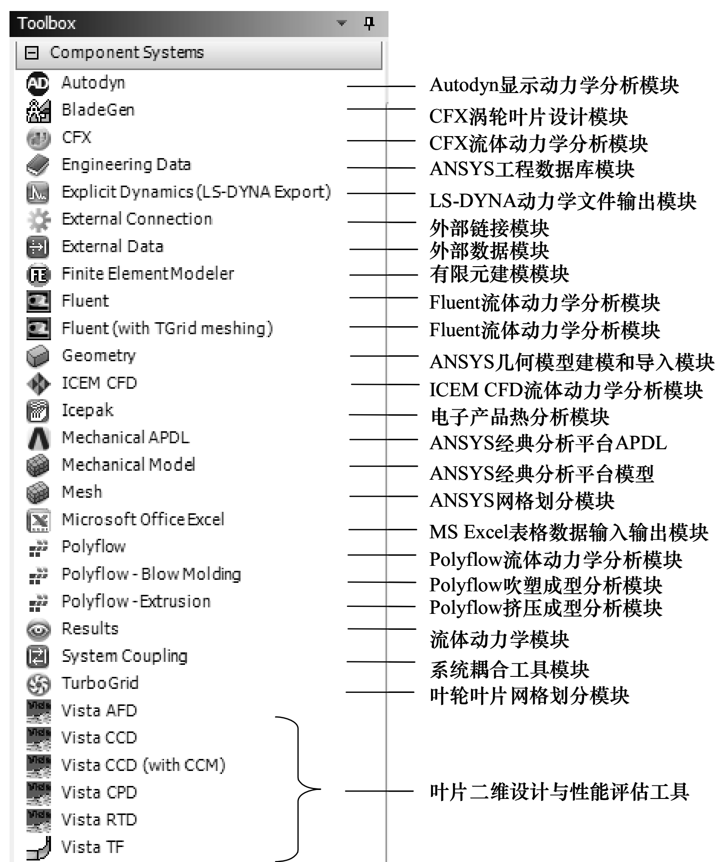


图 1-19 Component Systems（组件系统）

（3）Custom Systems（用户自定义系统） Custom Systems（用户自定义系统）用于耦合分析系统（FSI、Thermal-Stress）的预定义，在使用过程中根据需要自定义系统，如图 1-20 所示。

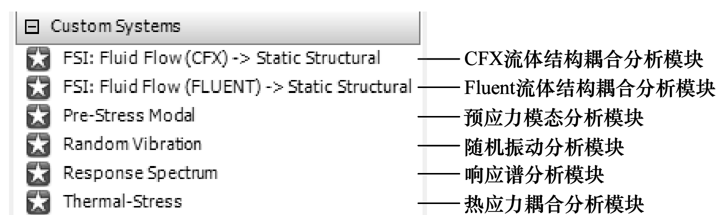


图 1-20 Custom Systems（用户自定义系统）

（4）Design Exploration（设计优化） Design Exploration（设计优化）用于参数的管理和优化，在设计优化中允许用如图 1-21 所示 5 种工具对零件目标值进行优化设计及分析。

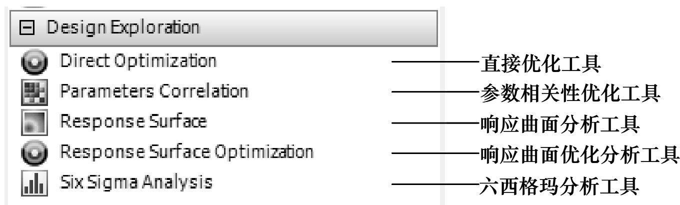


图 1-21　Design Exploration（设计优化）

> 提示：单击【Toolbox（工具箱）】窗口中的【View All/Customize】按钮View All / Customize...，弹出【Toolbox Customization】窗口，选择不同分析系统中工具前面的☑将在工具箱中显示该工具，取消对☐的选择将在工具箱中隐藏该工具。

4. 项目管理区

项目管理是定义一个或多个系统所需的工作流程。本节将对 ANSYS Workbench 的项目管理进行详细讲解，包括分析项目、删除项目、复制以及项目关联等。

当需要创建分析项目时，在工具箱中相关项目上双击或直接按住鼠标左键拖动到项目管理区即可，如图 1-22 所示。

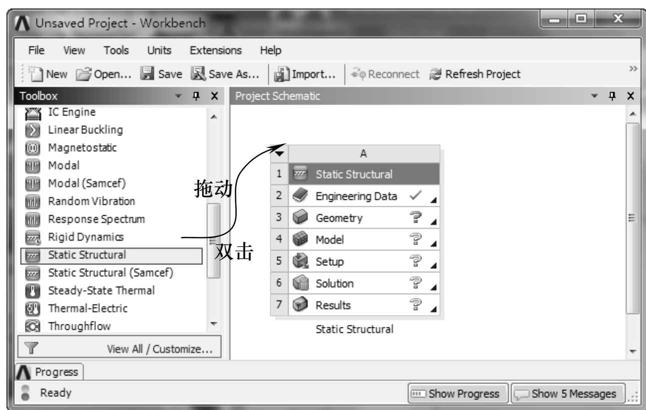


图 1-22　创建分析项目

5. 状态栏和信息窗口

状态栏显示系统操作提示和状态信息，单击右侧的【Show Progress】按钮Show Progress，弹出【Progress】窗口显示操作进程信息，如图 1-23 所示。单击右侧的【Show X Messages】按钮Show 5 Messages，弹出【Messages】窗口显示操作过程各种信息，如图 1-24 所示。

Progress

	A	B	C
1	Status	Details	Progress
2	Save project	Saving Engineering Data container	

图 1-23　【Progress】窗口

Messages

	A	B	C	D
1	Type	Text	sociati	Date/Time
3	Events	Automotive Powertrain Fluid -Structure Interaction (FSI)		
4	Events	Ask the Expert - External Data Mapping in ANSYS Workbench & Mechanical 14.0		
5	Events	Understanding Hardware Selection for Structural Mechanics		
6	Events	SPE Annual Technical Conference & Exhibition		

图 1-24　【Messages】窗口

1.3 ANSYS Workbench 项目管理

项目管理区（Project Schematic）也称为分析系统管理区，用来进行 Workbench 分析项目管理。它是通过图形来体现一个或多个系统所需要的工作流程，项目（Project）通常按照从左到右、从上到下的顺序进行管理和执行。

1.3.1 分析项目组成

要生成一个分析项目，需要从工具箱添加分析类型到项目管理区。一个分析项目是由一个个模块（单元）组成的，例如，Static Structural 分析项目如图 1-25 所示。

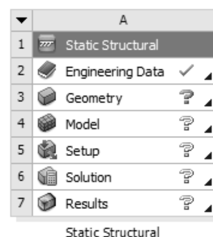


图 1-25　Static Structural 分析项目

Static Structural 分析项目包括以下单元：

✧ Engineering Data（工程数据）：使用工程数据可定义模型的材料属性。双击该单元格，可显示工程数据工作区，用户可选择或定义所需的材料属性参数。

✧ Geometry（几何模型）：导入、创建或编辑用于分析的几何模型，包括体、面、线、关键点等。

✧ Model（模型）：模型建立之后，需要划分网格，包括单元属性（单元类型、实常数、材料属性）、设定网格尺寸控制、网格划分等。

✧ Setup（设置）：用于设置参数，包括定义载荷、边界条件等。载荷是指加在有限元模型上的位移、力、温度、热、电磁等，载荷包括边界条件和内外环境对物体的作用。

✧ Solution（解决）：在所有的前处理工作完成后要进行求解，求解过程包括选择求解器、对求解进行检查、求解的实施及求解过程中会出现问题的解决等。

✧ Results（结果）：项目分析的最后一步是进行后处理，后处理就是对求解所得到的结果进行查看、分析和操作。结果单元即为显示的分析结果的可用性和状态，结果单元是不能与任何其他系统共享数据的。

1.3.2 创建分析项目

当需要进行某一项目分析时，通过双击 Toolbox（工具箱）相关项目或者用鼠标左键直接拖动到项目管理区即可生成一个新项目，如图 1-26 所示。

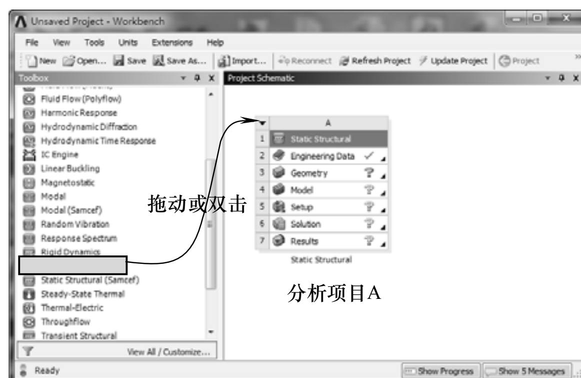


图 1-26　创建分析项目

提示：项目管理区可创建多个分析项目，每个项目均以字母自动编排（A、B、C…），同时各项目之间可以建立相应的关联分析，比如对同一模型进行不同的分析项目，这样可共享同一模型。

在进行项目分析的过程中，项目分析流程会出现不同的图标，提示用户进行相应的操作。各图标的含义见表 1-1。

表 1-1　各图标的含义

图　标	图 标 含 义
	执行中断：上行数据丢失，分析无法进行
	需要注意：可能需要修改本单元或上行单元
	需要刷新：上行数据发生改变，需要刷新单元（更新也会刷新单元）
	需要更新：数据改变时单元的输出也要相应更新
	更新完成：数据已经更新完成，可进行下一单元的操作
	输入变动：单元是局部更新的，但上行数据发生变化时也可能导致其发生改变

1.3.3　删除分析项目

对于不需要的分析项目可通过两种方式进行删除：选中分析项目中的第一栏（如 A1），单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Delete】命令；或者单击分析项目中的▾按钮，在弹出的下拉菜单中选择【Delete】命令，如图 1-27 所示。

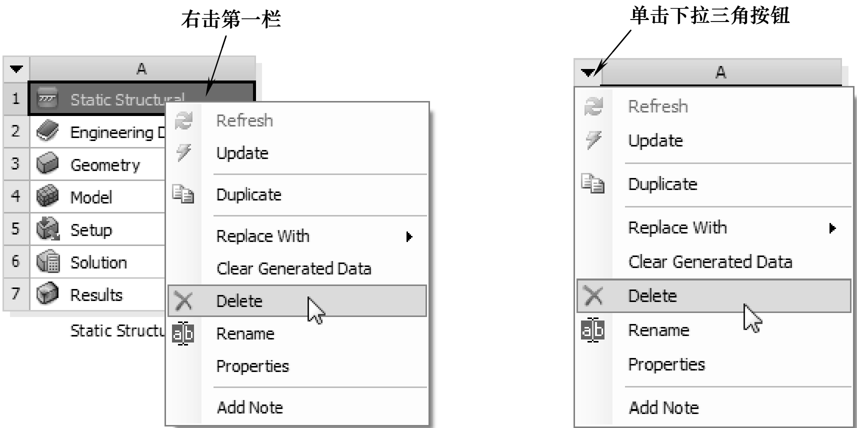


图 1-27　删除分析项目

1.3.4　复制项目

要复制项目可通过两种方式进行：选中分析项目中的第一栏（如 A1），单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Duplicate】命令；或者单击分析项目中的▾按钮，在弹出的下拉菜单中选择【Duplicate】命令，如图 1-28 所示。

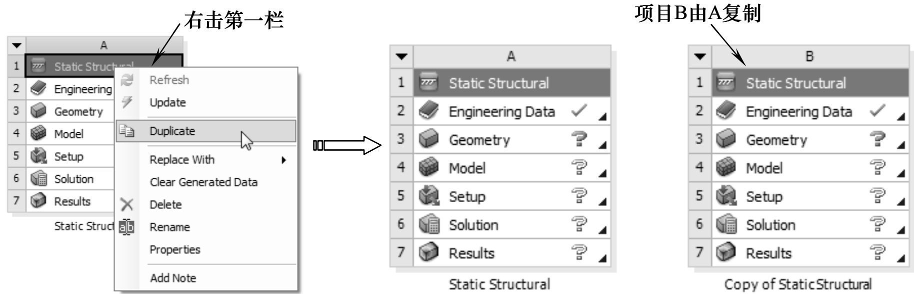


图 1-28　复制项目

注意：复制的项目与原项目数据完全相同，但二者不发生任何联系。

1.3.5　项目关联与链接

在 ANSYS Workbench 中进行项目分析时，需要对同一模型进行不同的分析，尤其是在进行耦合分析时，项目的数据需要进行交叉操作。为了避免重复操作，Workbench 提供了关联项目的协同操作方法。

创建项目关联的方法是：在工具箱中选中分析系统（Static Structural），按住鼠标左键，拖到项目管理区创建分析项目 B，当鼠标移动到项目 A 的相关项时，数据可共享的项红色高亮显示，如图 1-29 所示。在高亮显示处松开鼠标，此时即可创建关联项目，如图 1-30 所示。

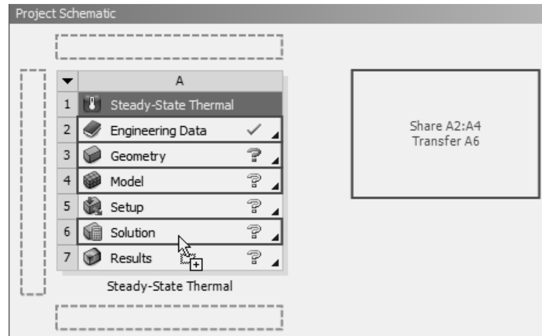


图 1-29　拖曳创建项目

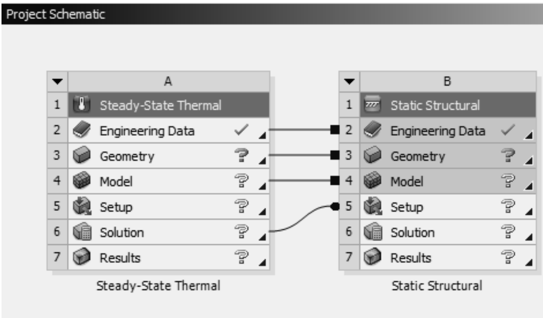


图 1-30　创建关联项目

提示：相关联的项呈暗色显示，暗色的项不能进行参数设置，为不可操作项，关联的项只能通过其上一级项目进行参数设置。项目之间的连线表示数据共享，例如图 1-30 中 A2 到 A4 表示项目 B 与项目 A 数据共享。

1.4　ANSYS 14.5 Workbench 分析的基本过程

利用 ANSYS 14.5 Workbench 进行数值模拟的基本过程如图 1-31 所示。

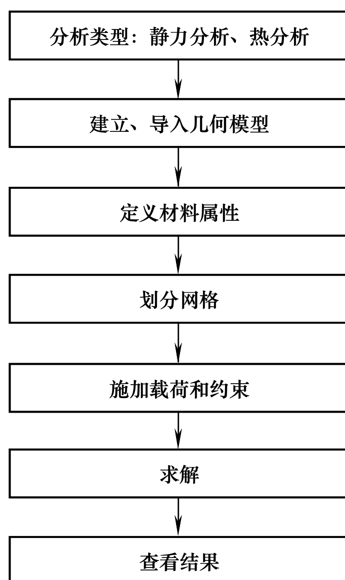


图 1-31　ANSYS 14.5 Workbench 分析流程

1）启动 ANSYS 14.5 Workbench 应用程序。

2）选择分析类型创建分析流程。选择需要的分析系统或组件，将其加入项目流程图中。

3）建立或导入模型。应用 DesignModeler 建立几何模型，或利用其他 CAD 软件创建实体模型，然后导入到 Workbench 之中。

4）定义材料属性。利用 Workbench 提供的工程数据或自定义材料性能来分配材料属性。

5）划分网格。利用 Meshing 技术划分分析模型的有限元网格。

6）施加载荷和约束。根据分析类型不同，施加分析所需的载荷和边界条件。如静力分析中的位移、压力、力，热分析中的温度、热流量、热通量等。

7）求解。根据分析需要设置分析求解选项，然后求解分析项目。

8）查看结果。查看分析结果，如静力分析中的应力和应变云图、热分析中的温度、热通量云图等。

1.5　本章小结

本章对 ANSYS Workbench 软件的功能模块、用户界面、项目管理等进行了讲解。读者通过学习，将熟悉 ANSYS Workbench 用户界面和基础操作方法，为后面的学习做好铺垫。

第 2 章　ANSYS 14.5 Workbench 建立分析模型

几何模型是进行有限元分析的基础，在工程项目进行有限元分析之前必须对其建立有效的几何模型。ANSYS Workbench 所用到的几何模型既可通过其他 CAD 软件导入，也可采用 ANSYS Workbench 集成的 DesignModeler 平台进行几何建模。本章将对 ANSYS Workbench 软件中的 DesignModeler 进行详细讲解，包括二维草图、实体特征、实体特征编辑、概念建模、参数化建模等。

2.1　DesignModeler 概述

DesignModeler 简称 DM，是 ANSYS Workbench 的几何建模平台，是一个参数化的基于特征的实体建模程序，可快速构建二维草图、三维模型或加载三维 CAD 模型进行并行工程数值模拟。

2.1.1　DesignModeler 模块的特点

创建设计模型是产品研发处理的第一步，也是核心内容之一。创建模型可以通过点、线、面、体等体素具体描述几何形状，也可以适当地使用梁、壳等体素将局部零件进行简化。

CAE 仿真计算要求具有独特的建模能力，它和计算机辅助设计（CAD）中的建模操作有所不同，一些独特的功能是 CAD 软件所不具备的，CAD 模型通常不会考虑 CAE 分析的需要，在 CAD 中建立的模型有时不适合仿真计算，DesignModeler 是它们之间的桥梁。

DesignModeler 提供了适用于有限元计算的建模功能，包括具体模型创建、CAD 模型修复、CAD 模型简化以及概念化模型创建功能。

1．几何建模功能

在强大的草图设计功能基础上，DM 提供丰富的三维建模工具来建立全参数化的几何模型。模型可以在任意 ANSYS 仿真软件中进行分析计算，也可进行优化分析。

（1）二维草图

- ✧ 直线、切线、折线、多边形、矩形、延长孔、圆、弧、样条、椭圆等丰富的草图绘制工具。
- ✧ 倒角、倒圆、切分、延伸、拖拉、复制、移动等操作编辑工具。
- ✧ 各种自动/手动尺寸定义工具。
- ✧ 固定、水平、竖直、垂直、相切、正交、同心、对称、等距等草图约束工具。

（2）三维参数化集合建模

- ✧ 球、柱、块体、平行六面体、锥体、棱柱体等几何原型。

✧ 拉伸、旋转、扫描、放样、曲面、倒角等三维建模方式。

2．CAD 模型修改功能

CAD 模型虽然能准确地表达研发产品的几何形状，但往往缺少仿真分析的一些特征。DM 提供的一些功能可实现仿真特征，如切分面功能（用于施加局部载荷）、定义点焊和在模型周围区域定义空气介质（用于流体分析）。

CAD 模型包含了太多的几何细节特征，而这些恰恰是仿真分析中不关心或可以简化的区域。DM 能够像 CAD 一样进行删除特征、抽壳、抑制几何体素、将多个零件合并组成单个零件等操作。

✧ 冻结、解冻、命名选择、自动抽取中面、连接、对称、填充等。
✧ 面延伸、碎面缝补、法矢量变换、切分、阵列等。
✧ 镜像、复制、移动、缩放、简化、切割/分离材料、印记面等实体操作功能。
✧ 布尔元素（加、减、交等）、面删除和边删除等。

3．概念建模

在产品研发过程中，基于板、壳、杆、梁等简化模型的概念建模及其仿真结果对于产品做结论性判断是非常有意义的，并且可以大大降低仿真成本。

✧ 由线/边创建梁、由线/草图创建板壳。
✧ 用于自定义梁截面、参数化梁截面库。

2.1.2 DesignModeler 用户界面

从 Component Systems（组件系统）中将【Geometry】拖入项目管理区（Project Schematic），双击 A 栏中的【Geometry】单元格，系统会进入到 DesignModeler 界面，包括菜单栏、工具栏、设计树、详细设置窗口、绘图区、状态栏等，如图 2-1 所示。

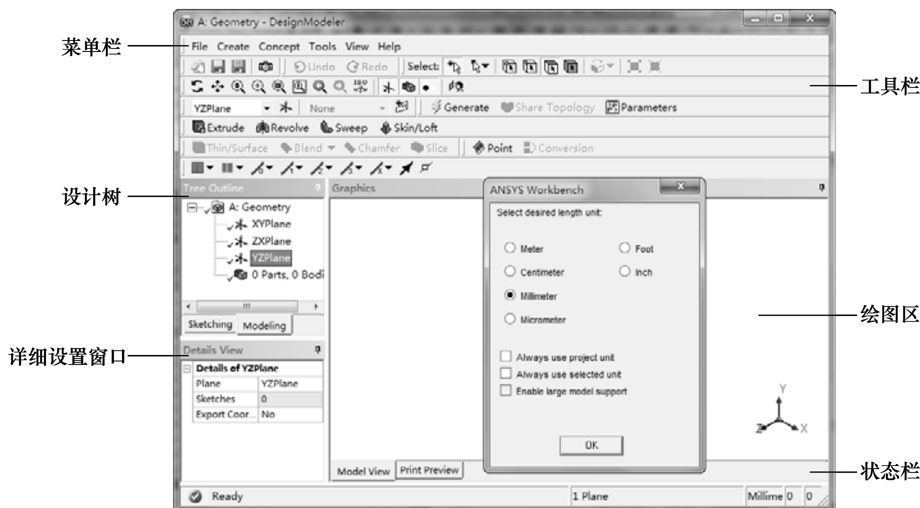


图 2-1　DesignModeler 用户界面

【ANSYS Workbench】对话框中相关选项参数的含义如下：

✧ Always use project unit：总是使用工程单位。

✧ Always use selected unit：总是使用选择的单位。

✧ Enable large model support：支持大模型。

1．DesignModeler 中的菜单

DesignModeler 界面中常用的菜单命令如下：

（1）【File】菜单 【File】菜单用于进行文件操作，包括常规文件输入、输出、与 CAD 交互、保存数据库文件以及脚本的运行功能，如图 2-2 所示。

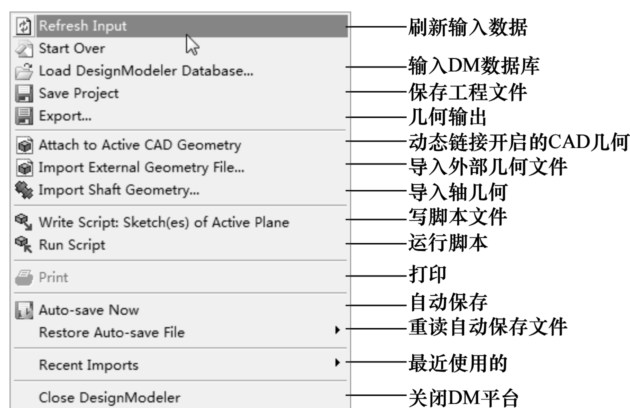


图 2-2 【File】菜单

（2）【Create】菜单 【Create】菜单用于进行三维图形创建和修改操作，包括三维特征创建、特征编辑和操作等功能，如图 2-3 所示。

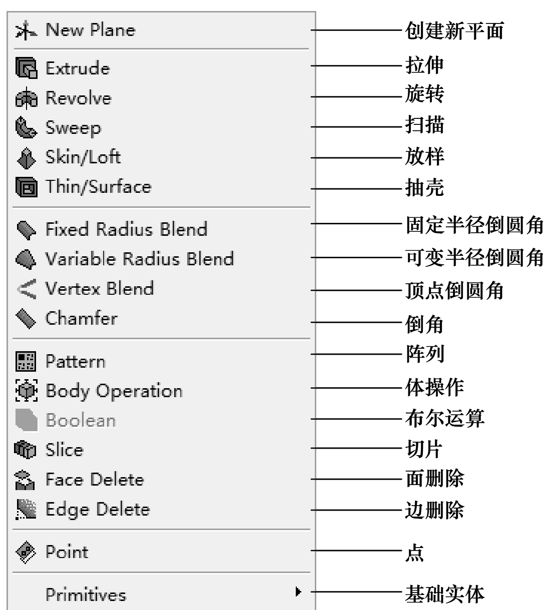


图 2-3 【Create】菜单

（3）【Concept】菜单 【Concept】菜单中包括对线体和面操作的一系列命令，包括线体的生成与面的生成等，如图 2-4 所示。

（4）【Tools】菜单　【Tools】菜单包含对线、体和面操作的一系列命令，包括解冻、冻结、命名、包围、填充等，如图 2-5 所示。

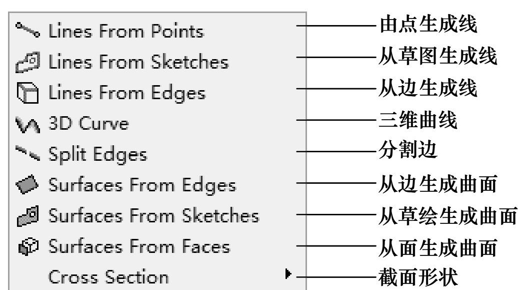


图 2-4 【Concept】菜单

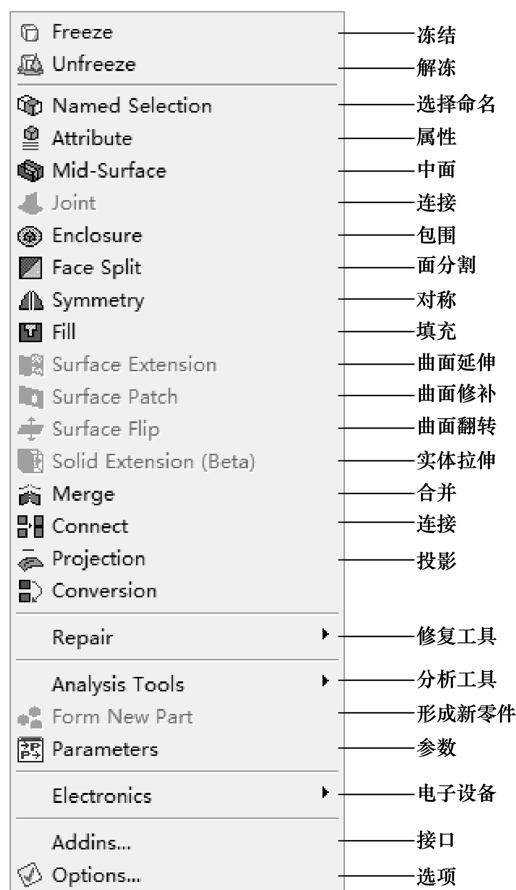


图 2-5 【Tools】菜单

（5）【View】菜单　【View】菜单中各个命令主要是对几何体显示操作，如图 2-6 所示。

（6）【Help】菜单　【Help】菜单提供了在线帮助等，如图 2-7 所示。

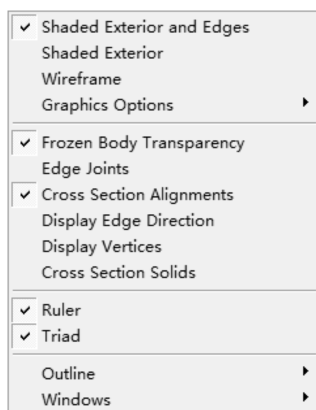


图 2-6 【View】菜单

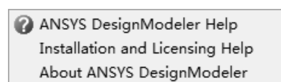


图 2-7 【Help】菜单

2．DesignModeler 中的工具栏

利用 DM 界面中的工具栏命令按钮是启动命令最方便的方法，下面介绍常用的 5 个工具栏。工具栏显示了常用的工具按钮，单击工具右侧的黑色三角，可展开下一级工具栏。

（1）【文件操作】工具栏 【文件操作】工具栏包含了 DM 常用命令，包括新建、保存、输出等命令，如图 2-8 所示。

（2）【选择】工具栏 【选择】工具栏中的命令用于图形选择，如图 2-9 所示。



图 2-8 【文件操作】工具栏



图 2-9 【选择】工具栏

（3）【视图】工具栏 【视图】工具栏可以激活鼠标视角控制，通过对图形的放大、缩小、移动、全局等控制图形的显示效果，如图 2-10 所示。



图 2-10 【视图】工具栏

（4）【平面/草图】工具栏 【平面/草图】工具栏用于控制选择草图绘制的基准面，并可以定义草图名称，如图 2-11 所示。



图 2-11 【平面/草图】工具栏

（5）【几何建模】工具栏 【几何建模】工具栏中的命令用于三维界面的各种运算，包括拉伸、旋转、扫描、放样等三维几何体创建操作，如图 2-12 所示。

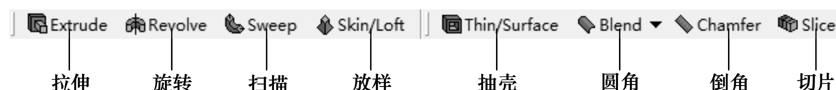


图 2-12 【几何建模】工具栏

3．设计树——Tree Outline

窗口左侧为设计树（Tree Outline），包括平面、特征、操作、几何模型等，它显示了整个建模流程中的所有特征操作，模型的变化随特征操作而改变。在设计树中有两种基本的操作模式：Modeling（实体模型）和 Sketching（草绘），如图 2-13 所示。

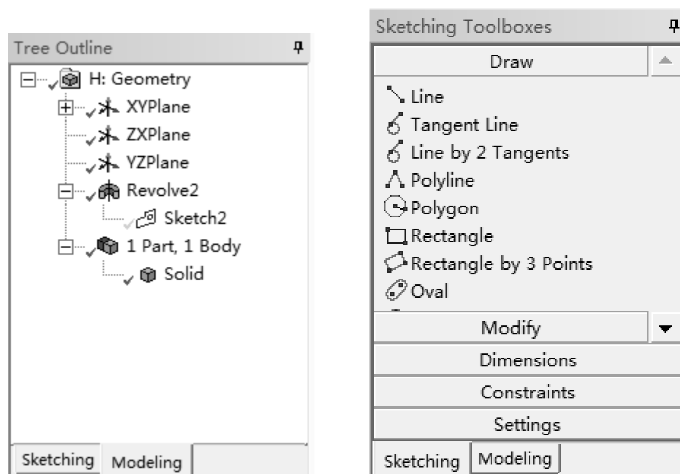


图 2-13　设计树

4．详细设置窗口

详细设置窗口中显示的是绘图命令的详细信息，通过参数列表可以定义相应的尺寸值等内容。

5．绘图区（图形区）

绘图区（图形区）用来显示图形的绘制结果，在绘图区可以直接预览图形的最终效果。

6．状态栏

窗口底部的状态栏提供了用户正执行功能的有关信息，并给出必要的提示信息。

2.1.3　鼠标选择操作

在 DM 建模中，鼠标操作是必不可少的。通常用户用的均为三键鼠标，三键鼠标的功能见表 2-1。

表 2-1　三键鼠标的功能

鼠 标 按 键	配 合 应 用	功　　能
左键	单击鼠标左键	选择几何体
	Ctrl+单击左键	添加或移除选定的实体
	按住左键+拖动光标	连续选择实体
中键	按住中键	自由旋转
	Ctrl+按住中键	拖动实体
	滚动	缩小/放大实体
右键	单击鼠标右键	弹出快捷菜单
	按住鼠标右键框选	窗口选择缩放（快捷操作）

2.2 二维草图绘制

草图绘制是使用 DesignModeler 建模的基础，所有的模型都是从草图开始的，常与实体建模工具相配合进行三维模型的绘制。

2.2.1 二维草图简介

草图是用于建立实体特征的二维图形组合，是 DesignModeler 建模的基础和关键。绘制草图就是绘制由线框几何元素构成的二维轮廓线。典型的草图实体有直线、圆弧、圆和椭圆等。在绘制草图之前，需要先了解一下草图的绘制过程，通常草图绘制可分为 5 步：

- ✧ 创建草图绘制所需的草绘平面。
- ✧ 创建新草图，启动草图绘制功能。
- ✧ 利用【Draw】草绘工具箱绘制草图的几何形状。
- ✧ 利用【Modify】编辑工具箱编辑草图的几何形状。
- ✧ 利用【Dimension】标注工具箱标注草图尺寸，利用【Constraints】工具箱约束草图几何关系。

2.2.2 创建新平面

要创建一幅草图，用户必须先指定草图图形所在的平面，称为草图平面。DesignModeler 提供了 3 个默认基准面：XYPlane、ZXPlane 和 YZPlane，右下角显示的是参考三重轴，如图 2-14 所示。

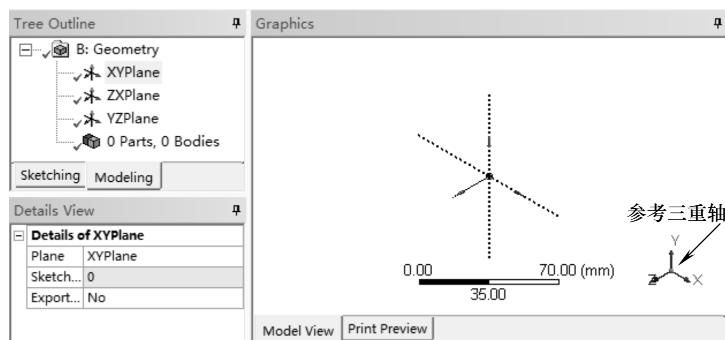


图 2-14 默认基准面

除了选择 3 个默认基准面作为草图绘制平面外，用户还可根据需要创建一个新的基准面。单击【平面/草图】工具栏上的【New Plane】按钮，或选择【Create】|【New Plane】命令来创建新平面，此时在设计树中将显示出新平面对象，在下面的详细设置窗口中可选择创建新平面的方式，如图 2-15 所示。

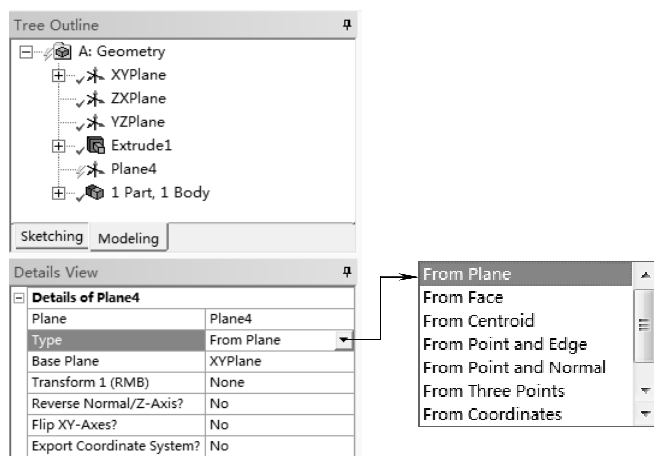


图 2-15　新平面详细设置窗口

1. From Plane（自平面）

From Plane（自平面）方法是指创建平行于已有平面的新平面，可指定等距距离，如图 2-16 所示。

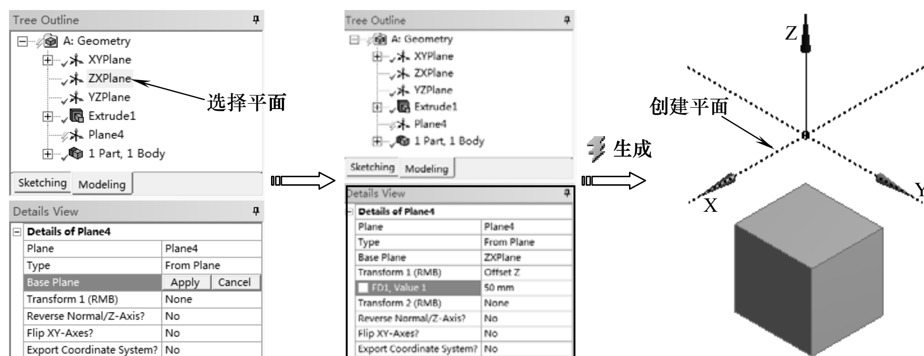


图 2-16　自平面

2. From Face（自表面）

From Face（自表面）方法是指创建平行于已有实体表面的新平面，可指定等距距离，如图 2-17 所示。

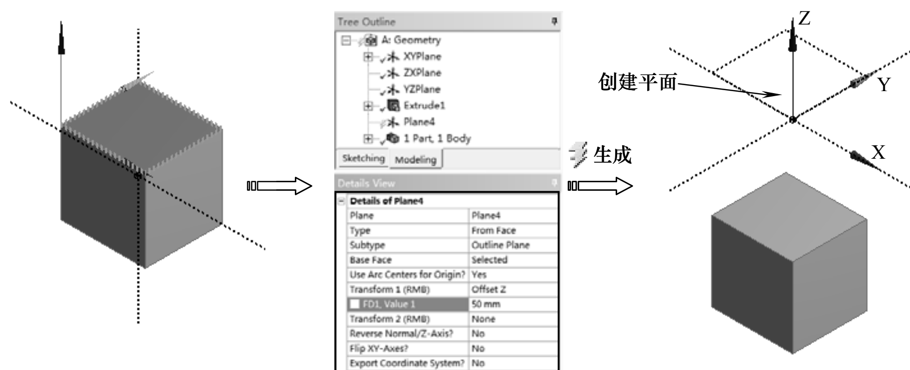


图 2-17　自表面

3. From Centroid（自质心）

From Centroid（自质心）方法是指通过所选实体质心按指定距离创建新平面，如图 2-18 所示。



图 2-18　自质心

4. From Point and Edge（自点和线）

From Point and Edge（自点和线）方法是指通过一个点和一条直线按指定距离创建新平面，如图 2-19 所示。



图 2-19　自点和线

5. From Point and Normal（自点和法线）

From Point and Normal（自点和法线）方法是指通过一个点和一条直线作为方向法线按指定距离创建新平面，如图 2-20 所示。

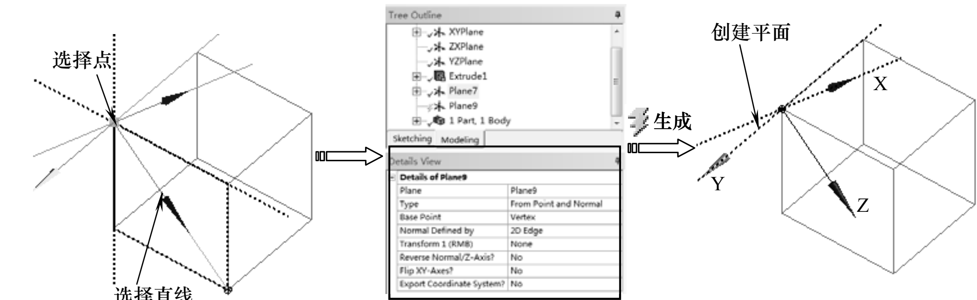


图 2-20　自点和法线

6. From Three Points（自三点）

From Three Points（自三点）方法是指通过 3 个点按指定距离创建新平面，如图 2-21 所示。

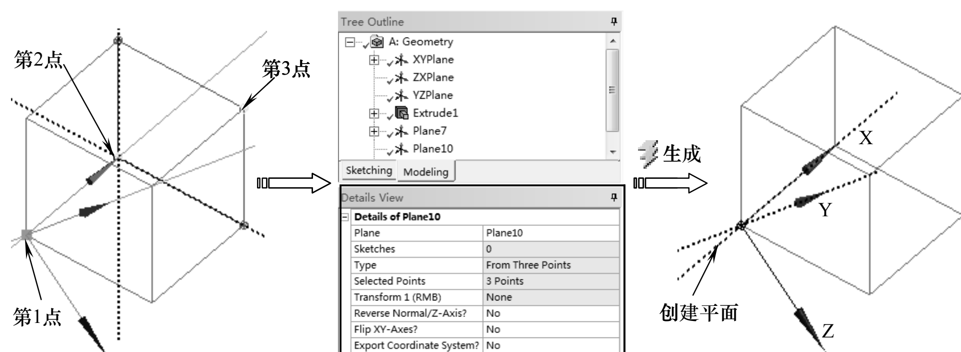


图 2-21　自三点

7. From Coordinates（自坐标）

From Coordinates（自坐标）方法是指通过指定原点和法线方向来指定距离创建新平面，如图 2-22 所示。

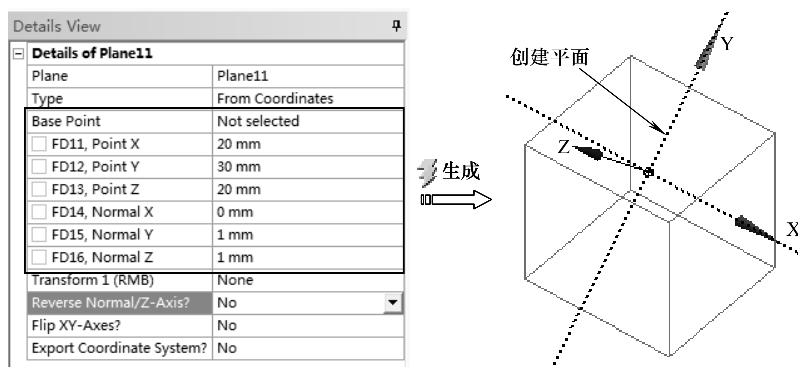


图 2-22　自坐标

2.2.3　创建新草图

创建新平面后，就可以在它上面建立新草图了。创建新草图的方式有以下两种。

1. 选择草绘平面法

在设计树中选择新创建草图的草绘平面，然后单击【平面/草图】工具栏上的【New Sketch】按钮，在激活的平面上就可以绘制草图了。新建草图放置在设计树上，且在所选草绘平面的下方，如图 2-23 所示。

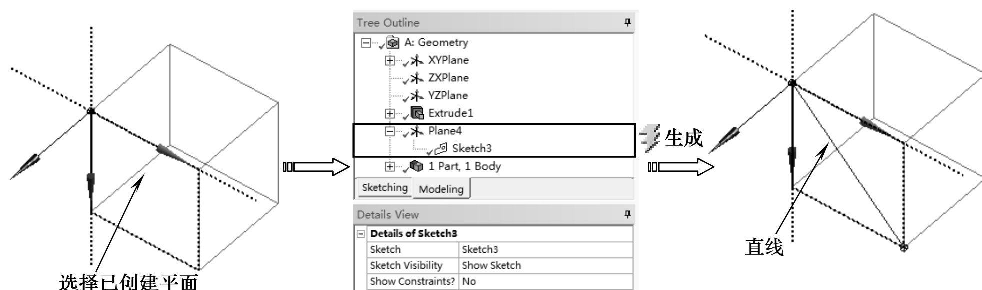


图 2-23　选择草绘平面法

2. 选择实体表面法

首先选中创建新平面所用的表面，然后在设计树中单击【Sketching】选项卡即可开始绘制草图，此时系统将自动根据所选平面创建新平面，并在新平面上自动创建草图，如图 2-24 所示。

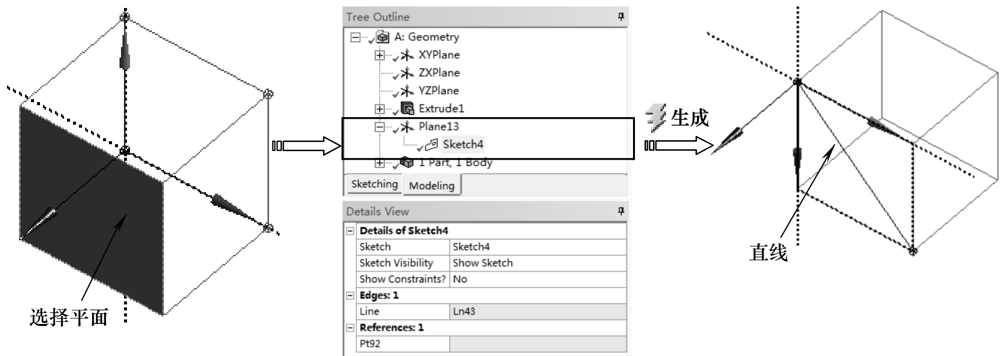


图 2-24　选择实体表面法

提示：当进行草绘时，单击【图形显示控制】工具栏上的【Look at Face/Plane/Sketch】按钮，可立即改变视图方向，使平面、草图或选定的实体与视线垂直。

2.2.4　创建草图元素——Draw

创建新草图后，就可以利用草绘工具箱创建新的二维图形了。在设计树中单击【Sketching】选项卡，出现【Draw】（草绘工具箱），如图 2-25 所示。

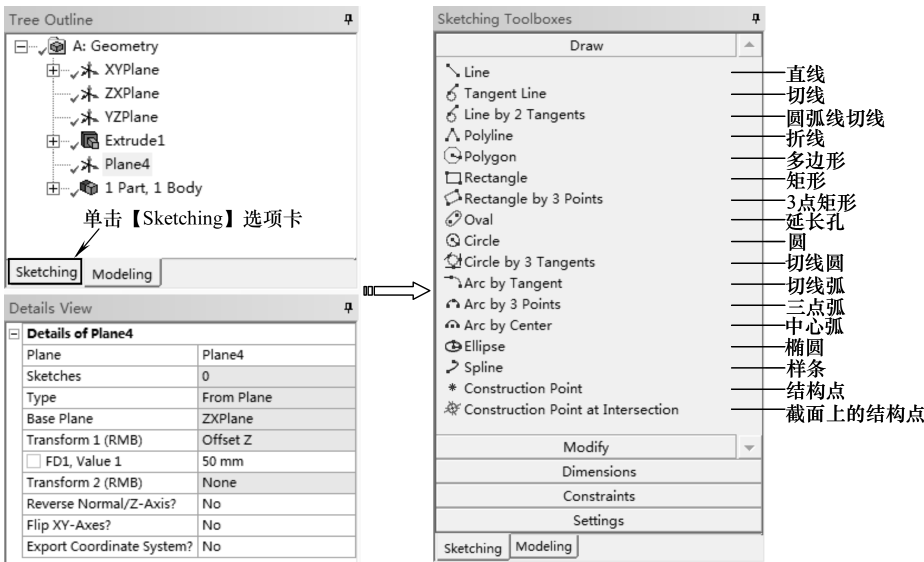


图 2-25　Draw（草绘工具箱）

1. Line（直线）

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Line】按钮 Line ，在图形区单击选择一点作为直线起点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择另一个点作为终点，系统自动创建直线，如

图 2-26 所示。

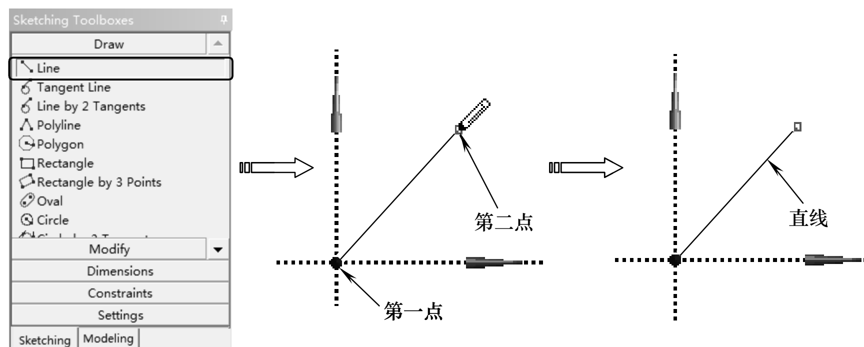


图 2-26　绘制直线

注意：在绘制直线时不要太注意直线的长度和角度，因为 DM 是一个尺寸驱动的软件，草图实体的大小是通过标注其尺寸来控制的。因此，绘制草图的过程中只需绘制近似的大小和形状即可。

2. Tangent Line（圆弧相切直线）

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Tangent Line】按钮 Tangent Line，在图形区单击圆或圆弧上一点作为直线起点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择另一个点作为终点，系统自动创建直线，如图 2-27 所示。

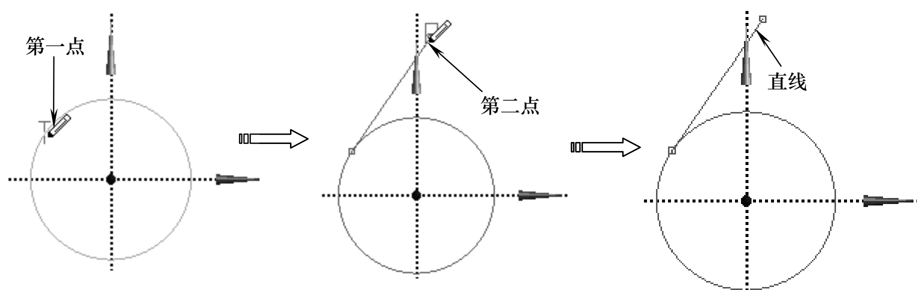


图 2-27　绘制圆弧相切直线

3. Line by 2 Tangents（两圆弧相切直线）

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Line by 2 Tangents】按钮 Tangent Line，在图形区依次选择两个圆或圆弧，系统自动创建直线，如图 2-28 所示。

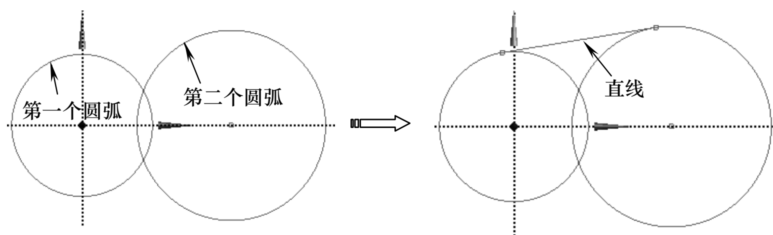


图 2-28　绘制两圆弧相切直线

4. Polyline（折线）

折线用于绘制封闭或开放的多段相连直线。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Polyline】按钮 Polyline，在图形区依次单击选择多个点作为直线端点，结束时单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Open End】命令创建开放折线，选择【Closed End】命令创建封闭折线，如图 2-29 所示。

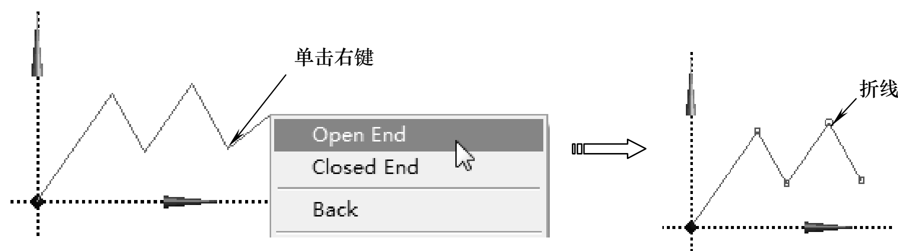


图 2-29　绘制折线

提示：如果绘制的图形不符合要求，可单击工具栏的【Undo】按钮 Undo 撤销上一次完成的草图操作。

5. Polygon（多边形）

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Polygon】按钮 Polygon，输入多边形边数后，在图形区单击选择一点作为中心，移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为多边形边上点，系统自动创建多边形，如图 2-30 所示。

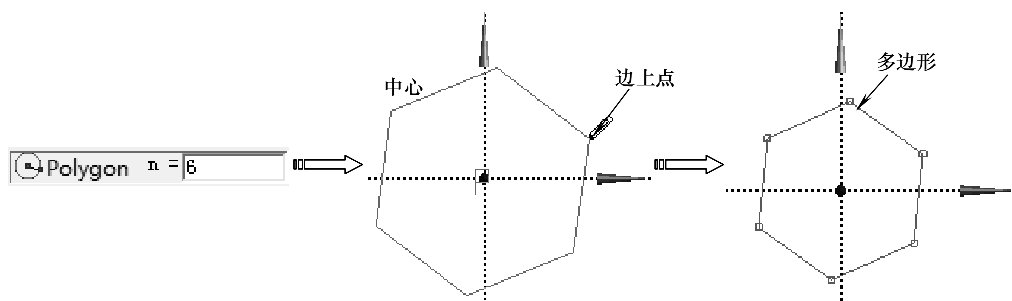


图 2-30　绘制多边形

6. Rectangle（两点矩形）

两点矩形用于通过两个对角点绘制与坐标轴平行的矩形。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Rectangle】按钮 Rectangle，在图形区单击选择一点作为矩形的一个角点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择另一个对角点，系统自动创建矩形，如图 2-31 所示。

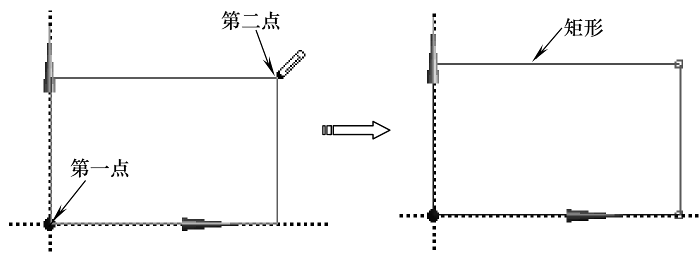


图 2-31　绘制两点矩形

7. Rectangle by 3 Points（三点矩形）

三点矩形用于绘制一个边与横轴成任意角度的矩形，通常需要选择 3 个点。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Rectangle by 3 Points】按钮 Rectangle by 3 Points，在图形区单击选择一点作为矩形的一个角点，移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为矩形第一条边的终点，然后向创建的第一条边平行的一侧拖动并单击，系统自动创建矩形，如图 2-32 所示。

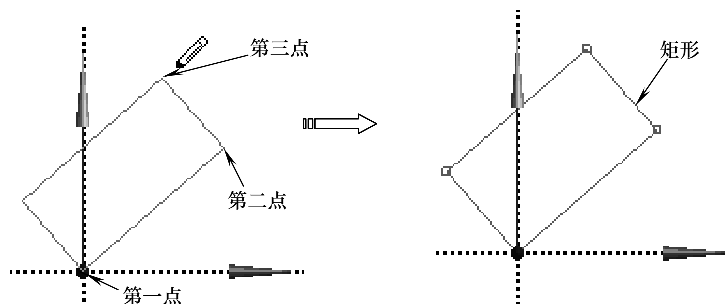


图 2-32　绘制三点矩形

提示：在矩形创建过程中，选中命令后面的【Auto Fillet】复选框，可实现自动倒角功能。

8. Oval（延长孔）

延长孔用于通过两点来定义轴，然后定义延长孔半径来创建延长孔。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Oval】按钮 Oval，在图形区单击选择一点作为延长孔轴线起点，移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为延长孔轴线终点，然后移动鼠标单击确定一点作为延长孔的半径，系统自动创建延长孔，如图 2-33 所示。

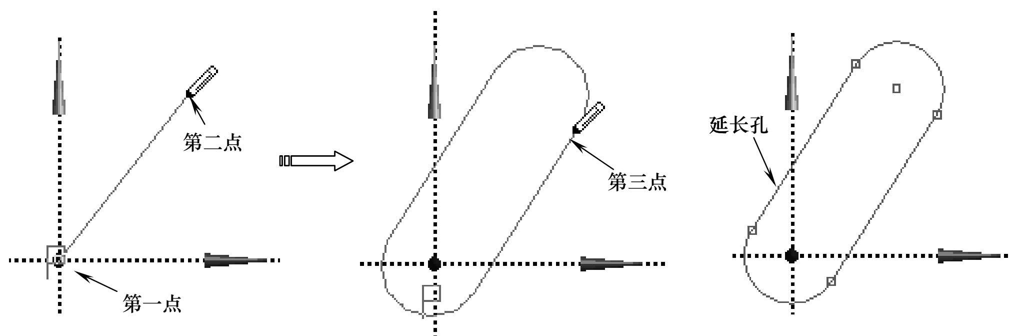


图 2-33　绘制延长孔

9. Circle（圆）

圆用于通过圆心和半径（或者圆上一点）来创建圆。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Circle】按钮 Circle，在图形区单击选择一点作为圆心，移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为圆上点，系统自动创建圆，如图 2-34 所示。

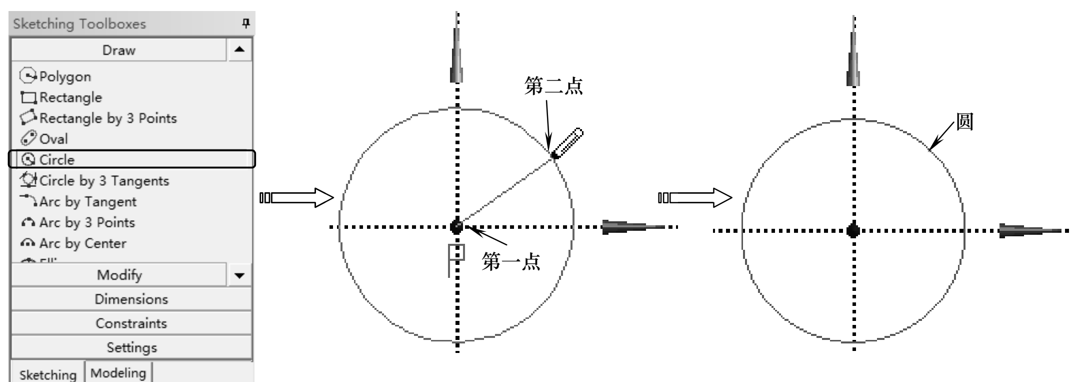


图 2-34　绘制圆

10. Circle by 3 Tangents（内切圆）

内切圆是指通过选择 3 条线创建与 3 条线内切的圆。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Circle by 3 Tangents】按钮 Circle by 3 Tangents，在图形区单击 3 条直线，系统自动创建圆，如图 2-35 所示。

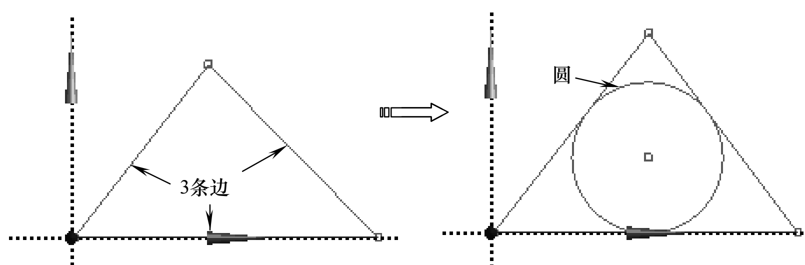


图 2-35　绘制内切圆

11. Arc by Tangent（切线弧）

切线弧是指从一条直线或圆弧开始绘制与直线或圆弧相切的圆弧。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Arc by Tangent】按钮 Arc by Tangent，在图形区选择一条直线或圆弧作为所绘制圆弧的起点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为圆上点，系统自动创建圆弧，如图 2-36 所示。

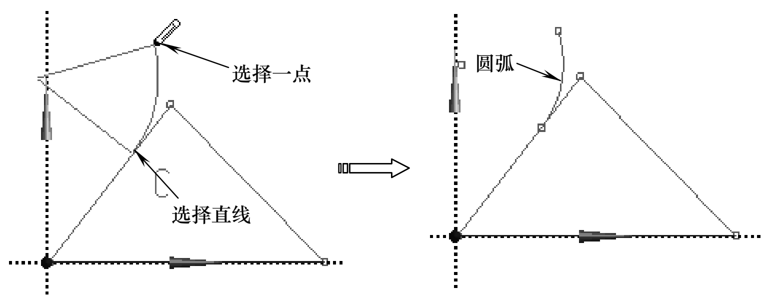


图 2-36　绘制切线弧

12. Arc by 3 Points（三点弧）

三点弧是指通过选择起点、终点和圆上一点来创建圆弧。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Arc by 3 Points】按钮 Arc by 3 Points，在图形区所需位置单击选择一点作为起点，接着单击另一点作为终点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为圆上点，系统自动创建圆弧，如图 2-37 所示。

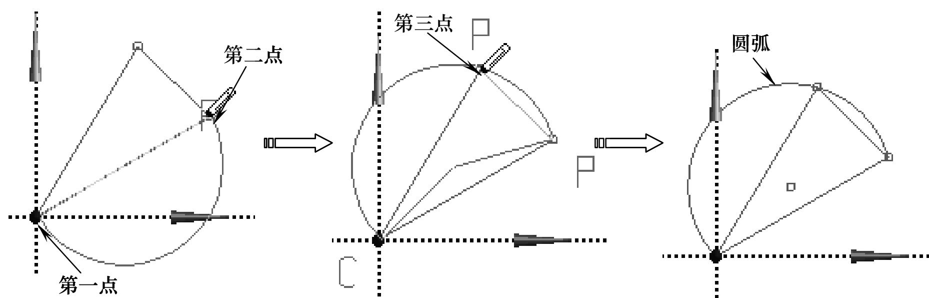


图 2-37　三点弧绘制圆弧

13. Arc by Center（中心弧）

中心弧是指通过指定圆心、起点和终点创建圆弧。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Arc by Center】按钮 Arc by Center，在图形区所需位置单击选择一点作为中心，接着单击另一点作为起点，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为终点，系统自动创建圆弧，如图 2-38 所示。

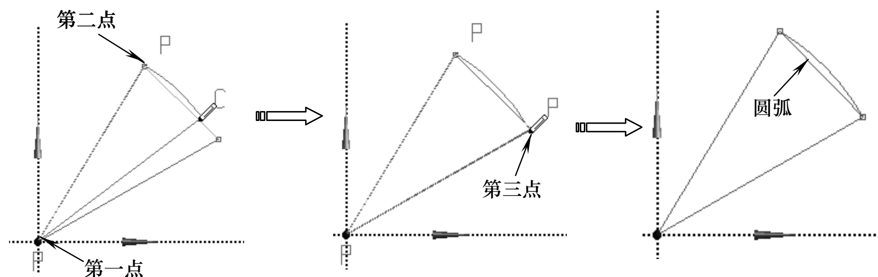


图 2-38　中心弧绘制圆弧

14. Ellipse（椭圆）

【椭圆】命令用于通过定义椭圆中心、长半轴端点和短半轴端点在草绘平面上绘制任意角度的椭圆。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Arc by Center】按钮 Arc by Center，在图形区单击选择一点作为椭圆中心，然后移动鼠标在图形区所需位置单击选择一点作为椭圆长轴端点，再次选择一点作为椭圆上的一点，系统自动创建椭圆，如图 2-39 所示。

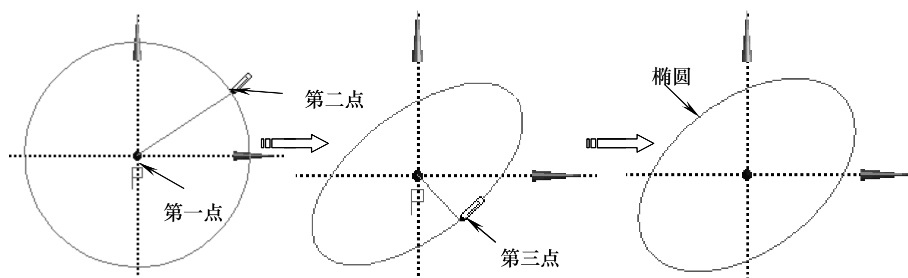


图 2-39　绘制椭圆

15. Spline（样条）

【样条】命令用于通过一系列控制点来创建样条曲线。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Spline】按钮 Spline ，在图形区依次单击选择多个点作为直线端点，结束时单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Open End】命令创建样条，选择【Closed End XXX】命令可创建封闭样条，如图 2-40 所示。

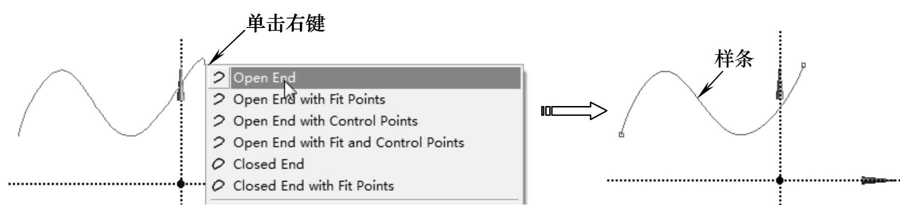


图 2-40　绘制样条

16. Construction Point（结构点）

结构点用于创建点。

单击【Draw】（草绘工具箱）的【Construction Point】按钮 * Construction Point，在图形区单击选择一点创建点，如图 2-41 所示。

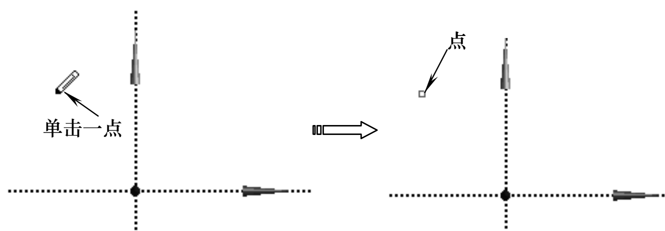


图 2-41　绘制点

2.2.5　编辑草图元素——Modify

创建新草图后，就可以利用草绘工具箱编辑创建的二维图形了。在设计树中单击【Sketching】选项卡，出现【Modify】（编辑工具箱），如图 2-42 所示。

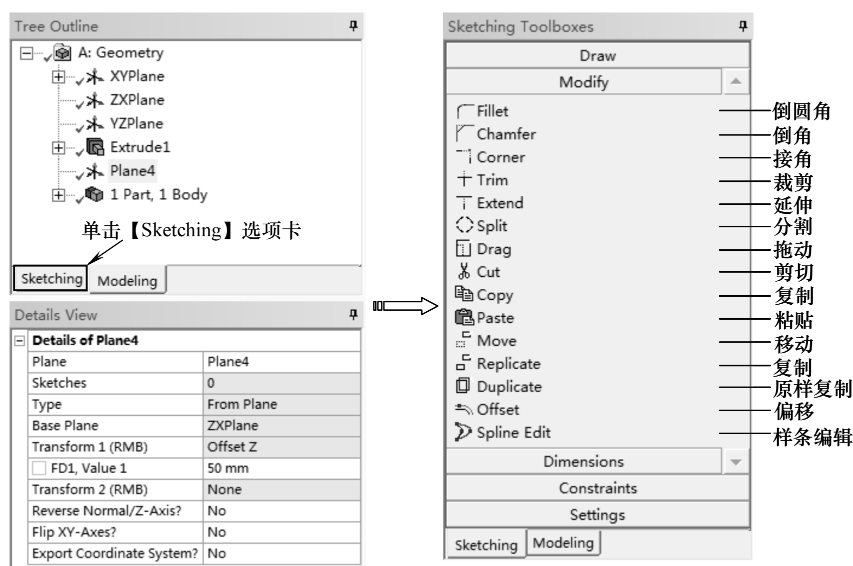


图 2-42　Modify（编辑工具箱）

1. Fillet（圆角）

【圆角】命令将创建与两个直线或曲线图形对象相切的圆弧。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Fillet】按钮 Fillet ，定义圆角半径后，在图形区依次单击选择倒圆角的两条边，系统自动创建圆角，如图 2-43 所示。

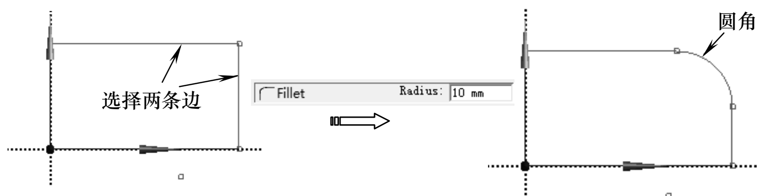


图 2-43　绘制圆角

2. Chamfer（倒角）

【倒角】命令用于使用不同的修剪选项在两条直线之间创建倒角。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Chamfer】按钮 Fillet ，定义倒角参数后，在图形区依次单击选择倒角的两条边，系统自动创建倒角，如图 2-44 所示。

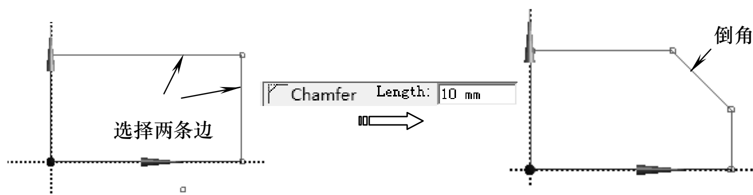


图 2-44　绘制倒角

3. Corner（接角）

【接角】命令用于使用不同的修剪选项在两条直线之间创建倒角。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Corner】按钮 Corner，在图形区依次单击选择连接的两条边，系统自动创建接角，如图 2-45 所示。

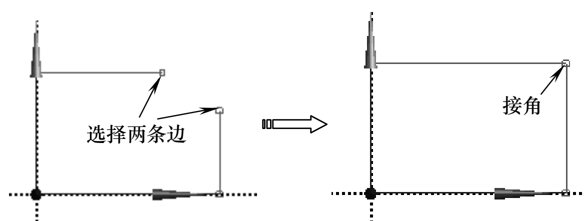


图 2-45　绘制接角

4．Trim（裁剪）

【裁剪】命令是将两条相交直线或曲线之一的外伸部分裁剪掉。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Trim】按钮 Trim，在图形区单击要裁剪掉的伸出部分，系统自动实现裁剪，如图 2-46 所示。

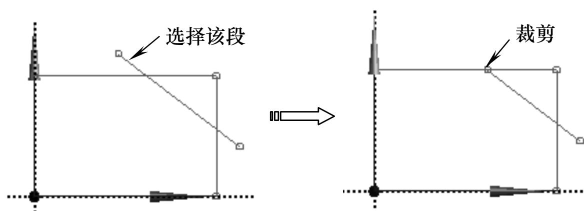


图 2-46　裁剪

5．Extend（延伸）

延伸是将两条相交直线或曲线之一的短缺部分自动延伸至相交处。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Extend】按钮 Extend，在图形区单击靠近延伸部分，系统自动实现延伸，如图 2-47 所示。

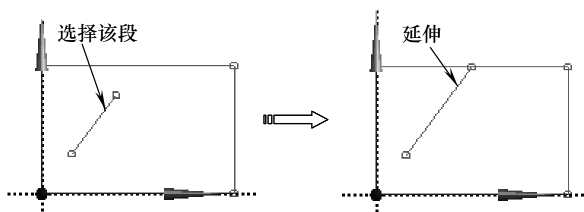


图 2-47　延伸

6．Split（分割）

分割是将直线或曲线进行分割，包括【Split Edge at Selection】（在选择点分割）、【Split Edges at Point】（在已存在的点处分割）、【Split Edge at All Points】（在已存在的所有点处分割）、【Split Edge into n Equal Segments】（将边分割成 n 等份）。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Split at Select】按钮 Split at Select，然后单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Split Edge at Selection】命令，然后在图形区要分割的位置单击，

系统自动实现分割，如图 2-48 所示。

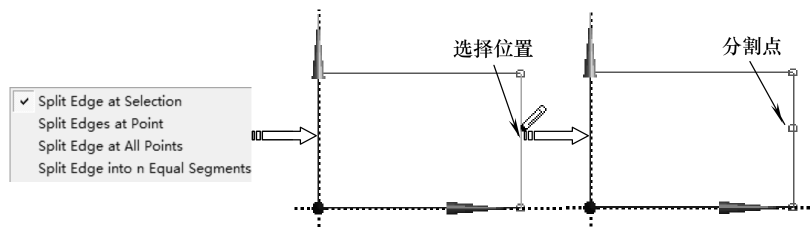


图 2-48　分割

7. Drag（拖动）

拖动是指拖动操作的一个点或线，模型的变化取决于选中的图形、已有的约束和尺寸。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Drag】按钮 Drag，在图形区选择要拖动的元素，直接按住鼠标左键拖动即可，如图 2-49 所示。

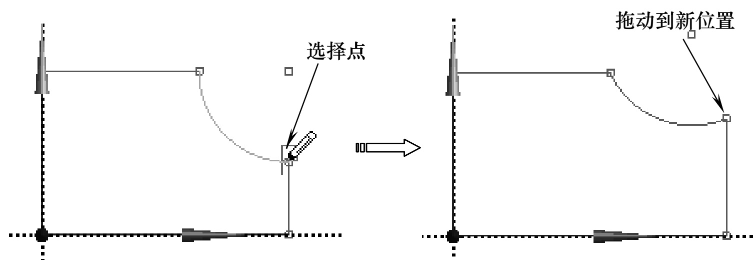


图 2-49　拖动

8. Cut、Copy 和 Paste（剪切、复制和粘贴）

剪切和复制功能类似，共同之处在于内容都被储存在剪贴板上，不同的是复制在图形区不删除。粘贴是将粘贴板上的内容按某种方式粘贴在图形区。

选择要复制的对象，单击【Modify】（编辑工具箱）的【Copy】按钮 Copy，单击【Modify】（编辑工具箱）的【Paste】按钮 Paste，移动鼠标在所需位置单击，可将复制内容粘贴，如图 2-50 所示。

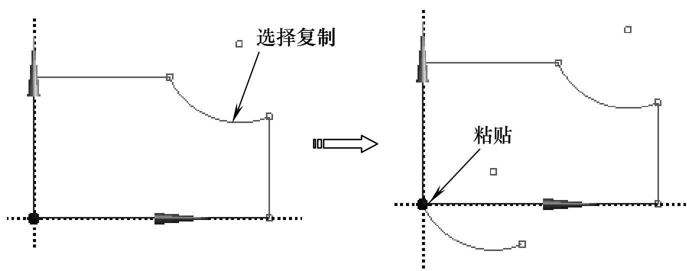


图 2-50　复制和粘贴

9. Offset（偏移）

【偏移】命令用于对已有直线、圆等草图元素进行偏移复制。

单击【Modify】（编辑工具箱）的【Offset】按钮 Offset，在图形区选择要偏移的元素，直接按住鼠标左键拖动即可，如图 2-51 所示。

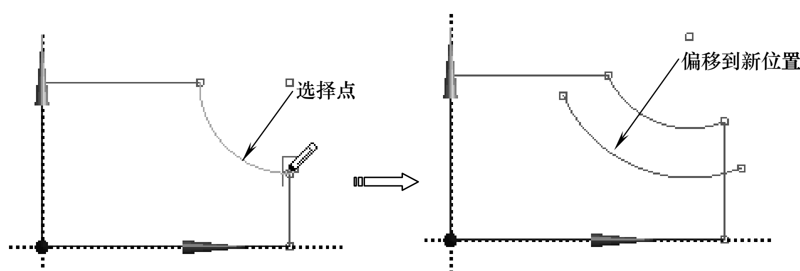


图 2-51　偏移

10. Sketch Projection（草图投影）

草图投影允许将一个图形元素（点、边、面或体）投影到一个平面上来创建草图元素，这种投影是关联的，也就是当源图形被更新时，投影图形也将更新。

选择要投影的目标平面，单击鼠标右键，选择【Insert】|【Sketch Projection】命令，选择投影元素，单击详细设置窗口的【Geometry】选项下的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成投影元素，如图 2-52 所示。

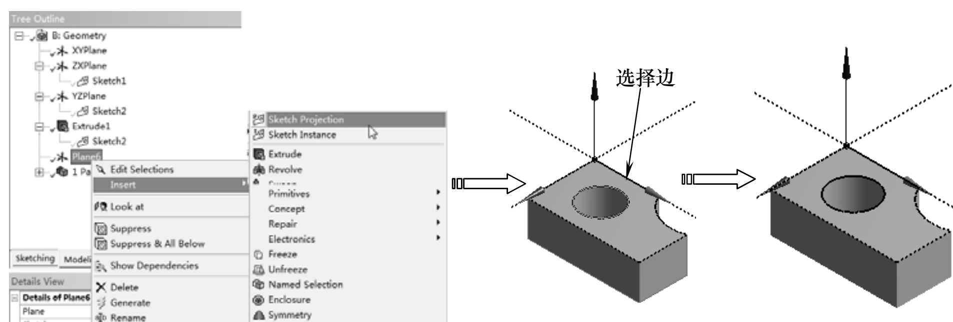


图 2-52　草图投影

11. Sketch Instance（草图援引）

草图援引是用来复制源草图并将其加入到目标面中，复制的草图和源草图始终保持一致。也就是说，复制对象随源对象更新而更新。

选择目标平面，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Sketch Instance】命令，选择源草图，单击详细设置窗口的【Base Sketch】选项下的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成草图援引，如图 2-53 所示。

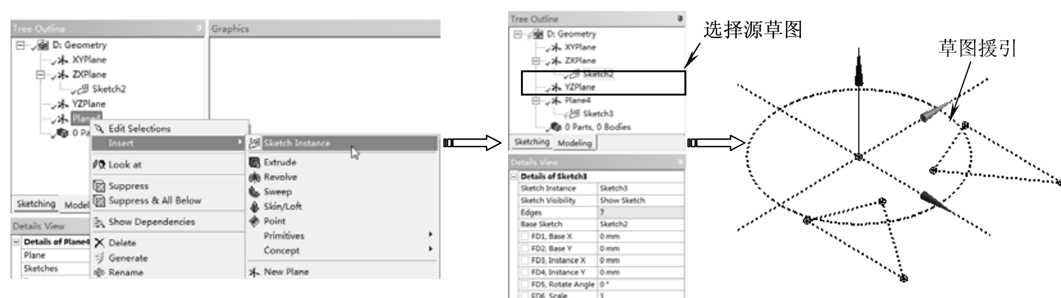


图 2-53　草图援引

2.2.6　标注草图尺寸——Dimension

尺寸约束就是用数值约束图形对象的大小。尺寸约束以尺寸标注的形式标注在相应的图形对象上。被尺寸约束的图形对象只能通过改变尺寸数值来改变它的大小，也就是尺寸驱动。

创建新草图后，就可以利用尺寸标注工具箱标注尺寸了。在设计树中单击【Sketching】选项卡，出现【Dimensions】(尺寸标注工具箱)，如图 2-54 所示。

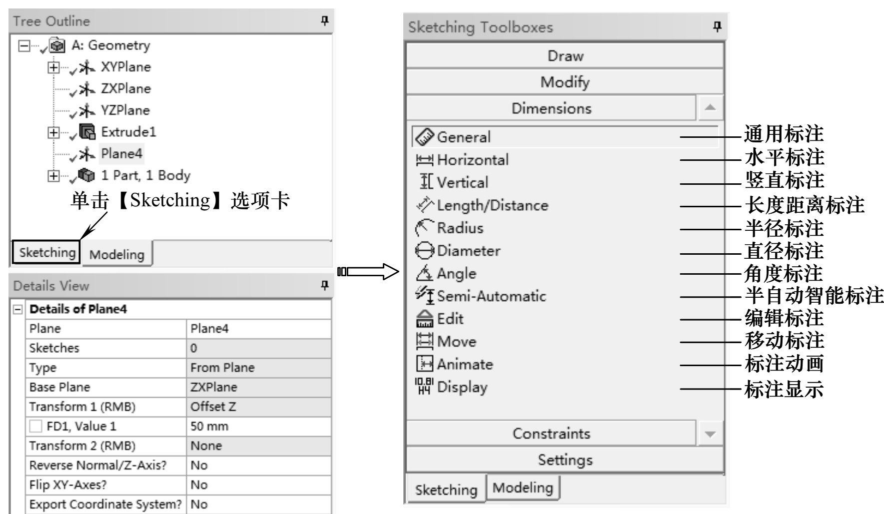


图 2-54 【Dimensions】(尺寸标注工具箱)

尺寸标注相对比较简单，下面只介绍“General (通用标注)”和“Semi-Automatic (半自动智能标注)”。

1. General (通用标注)

通用标注可以直接在图形中进行智能尺寸标注，还可以通过单击右键在弹出的快捷菜单中标注所需的尺寸类型。

单击【Dimensions】(尺寸标注工具箱) 的【General】按钮 General ，在图形区单击要标注的对象，然后在详细设置窗口中的【Dimensions】选项下输入尺寸值即可，如图 2-55 所示。

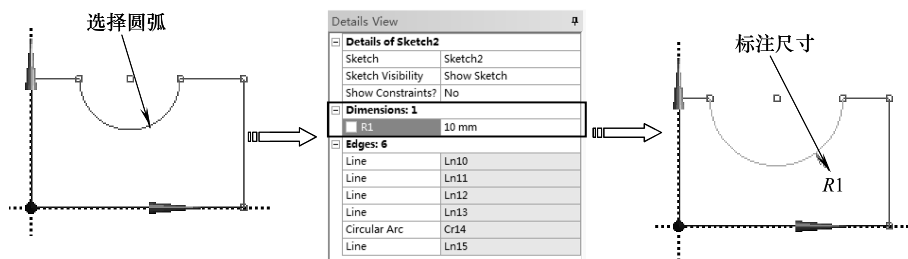


图 2-55　标注尺寸

2. Semi-Automatic (半自动智能标注)

半自动智能标注可依次给出待标注的尺寸直到模型完全约束或用户选择退出自动模式。

单击【Dimensions】（尺寸标注工具箱）的【Semi-Automatic】按钮 Semi-Automatic，在图形区依次标注所有尺寸，然后在详细设置窗口中的【Dimensions】选项下输入尺寸值即可，如图 2-56 所示。

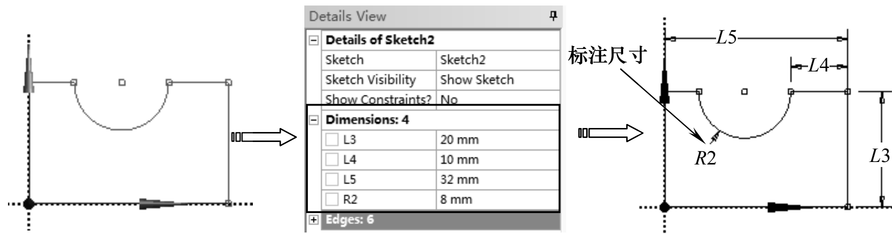


图 2-56　半自动智能标注

2.2.7　草图几何约束——Constraints

几何约束是指一个或多个图形相互的关系，如平行、垂直、同心等。

创建新草图后，就可以利用几何约束约束草图形状了。在设计树中单击【Sketching】选项卡，出现【Constraints】（几何约束工具箱），如图 2-57 所示。

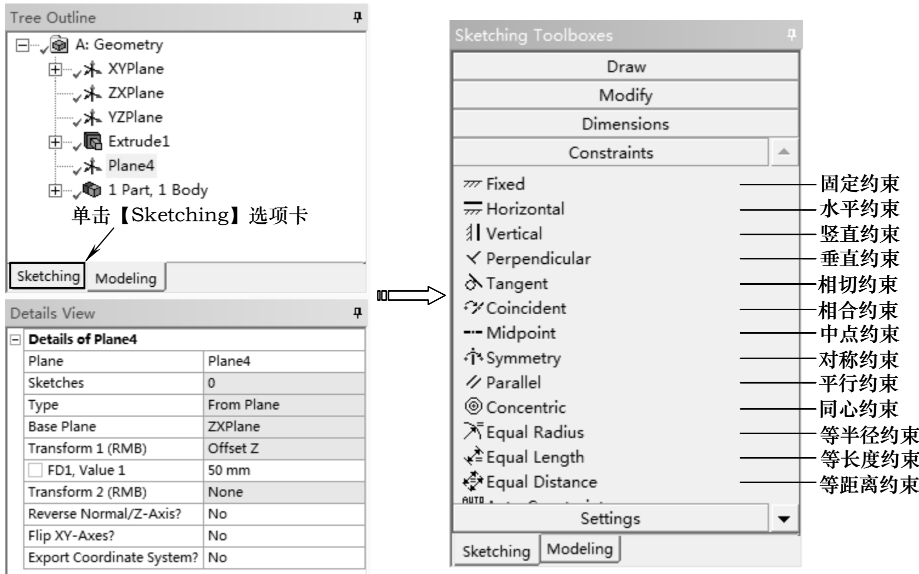


图 2-57　【Constraints】（几何约束工具箱）

约束创建相对比较简单，下面只介绍“Horizontal（水平约束）”和“Tangent（相切约束）”。

1. Horizontal（水平约束）

水平约束是将草图直线强制转变成水平直线，或将椭圆变成水平放置的约束功能，如图 2-58 所示。

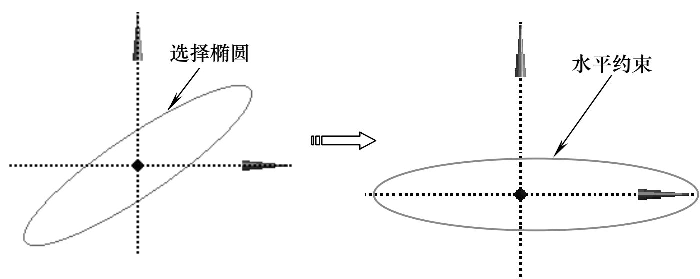


图 2-58　水平约束

2. Tangent（相切约束）

相切约束是将草图边或线强行与圆相切的约束功能，如图 2-59 所示。

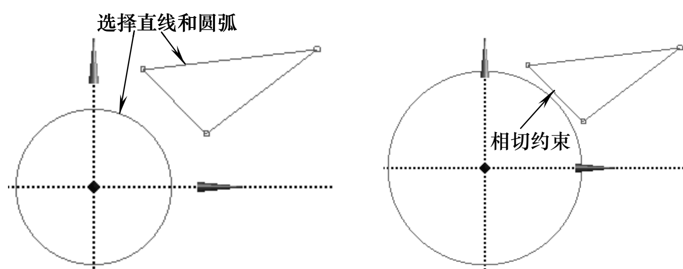


图 2-59　相切约束

2.2.8　草图设置——Settings

草图设置用于设置网格显示和捕捉功能。在设计树中单击【Sketching】选项卡，出现【Settings】（设置工具箱），如图 2-60 所示。

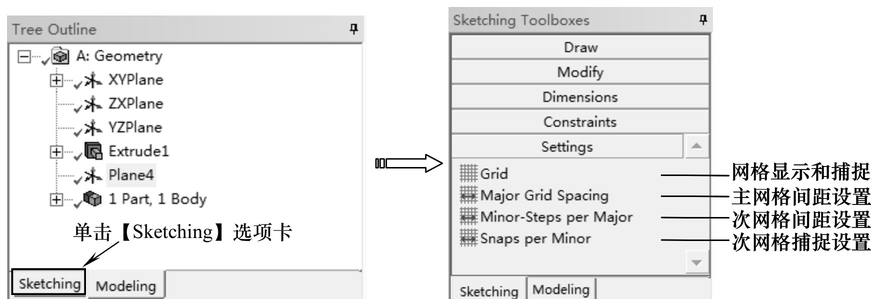


图 2-60　【Settings】（设置工具箱）

2.3　实体特征建模

DesignModeler（DM）最重要的目标是为分析环境提供几何模型，为此它提供了 3 种不同的分析体类型：

✧　实体（Solid）：具有体积和面积的体。

✧ 面体（Surface body）：具有面积而无体积的体。

✧ 线体（Line body）：完全由线组成的体，无边、面积和体积。

默认情况下，DM 自动将生成的每个体放在一个零件中，单个零件一般独自进行网格划分。如果各单独的体共享面，则共享面上的网格划分不能匹配，但单个零件上的多个体可以共享面上划分匹配的网格。

2.3.1 基础实体建模

DesignModeler 基础实体特征主要有球体特征、长方体特征、圆锥体特征和圆环体特征等。下面分别简单加以介绍。

1. Sphere（球体）

选择【Create】|【Primitives】|【Sphere】命令，在详细设置窗口中设置球体的名称，圆点放置方式，沿 X、Y、Z 三个方向的平移距离、球体半径等，单击【Generate】按钮，创建球体，如图 2-61 所示。

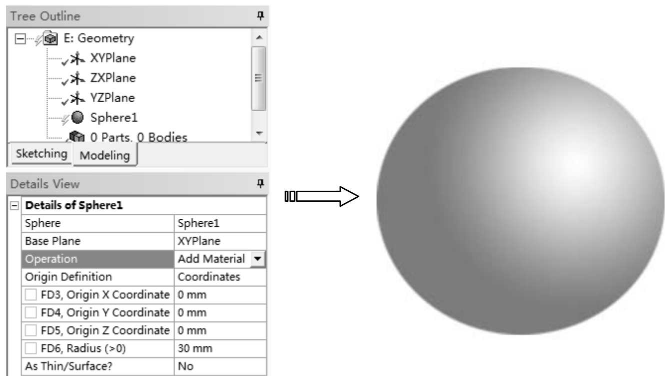


图 2-61　创建球体

2. Box（块体）

选择【Create】|【Primitives】|【Box】命令，在详细设置窗口中设置块体的名称、角点和长、宽、高等，单击【Generate】按钮，创建块体，如图 2-62 所示。

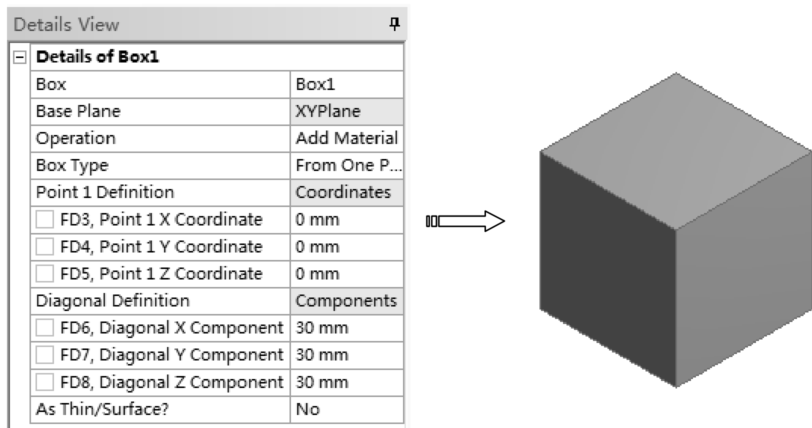


图 2-62　创建块体

3. Parallelepiped（平行六面体）

选择【Create】|【Primitives】|【Parallelepiped】命令，在详细设置窗口中设置平行六面体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建平行六面体，如图 2-63 所示。

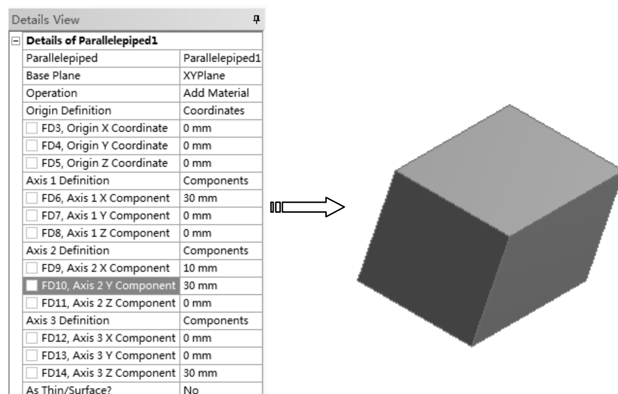


图 2-63　创建平行六面体

4. Cylinder（圆柱体）

选择【Create】|【Primitives】|【Cylinder】命令，在详细设置窗口中设置圆柱体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建圆柱体，如图 2-64 所示。

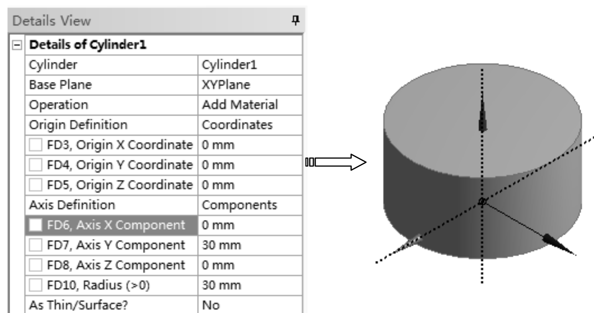


图 2-64　创建圆柱体

5. Cone（圆锥体）

选择【Create】|【Primitives】|【Cone】命令，在详细设置窗口中设置圆锥体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建圆锥体，如图 2-65 所示。

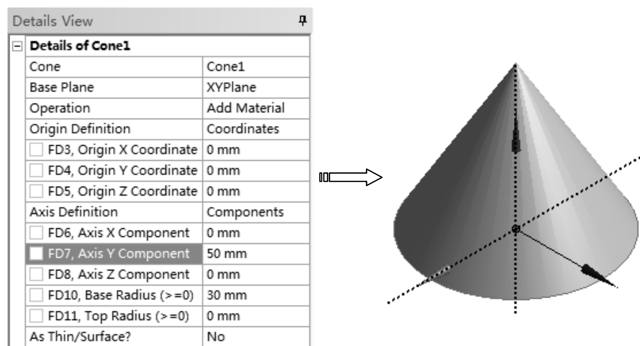


图 2-65　创建圆锥体

6．Prism（棱柱体）

选择【Create】|【Primitives】|【Prism】命令，在详细设置窗口中设置棱柱体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建棱柱体，如图 2-66 所示。

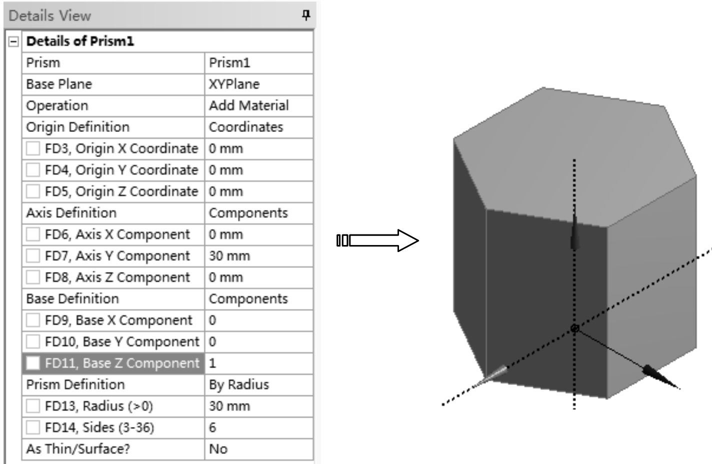


图 2-66　创建棱柱体

7．Pyramid（棱锥体）

选择【Create】|【Primitives】|【Pyramid】命令，在详细设置窗口中设置棱锥体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建棱锥体，如图 2-67 所示。

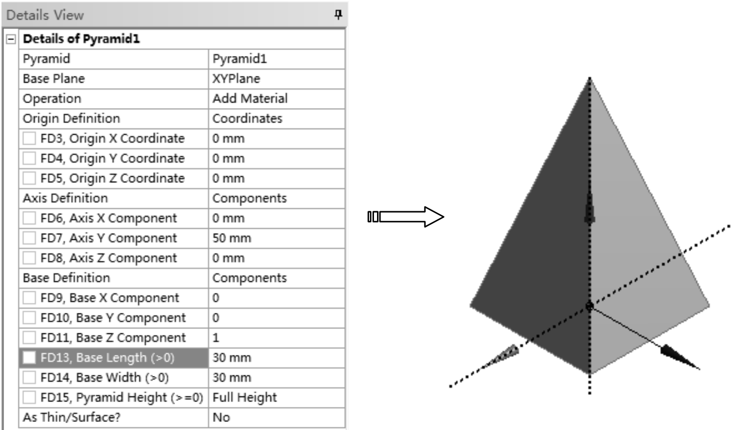


图 2-67　创建棱锥体

8．Torus（圆环体）

选择【Create】|【Primitives】|【Torus】命令，在详细设置窗口中设置圆环体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建圆环体，如图 2-68 所示。

9．Bend（弯曲体）

选择【Create】|【Primitives】|【Bend】命令，在详细设置窗口中设置弯曲体的名称和参数等，单击【Generate】按钮，创建弯曲体，如图 2-69 所示。

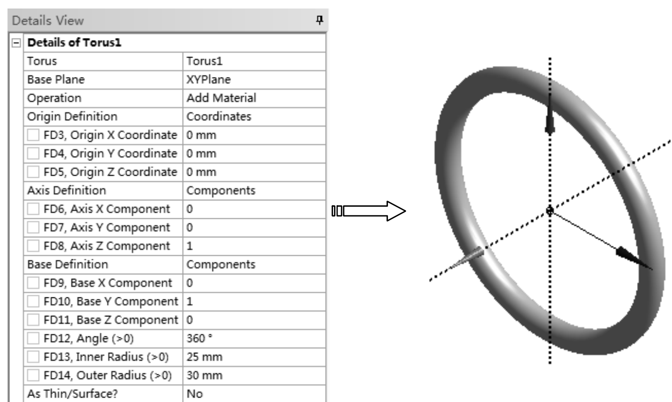


图 2-68　创建圆环体

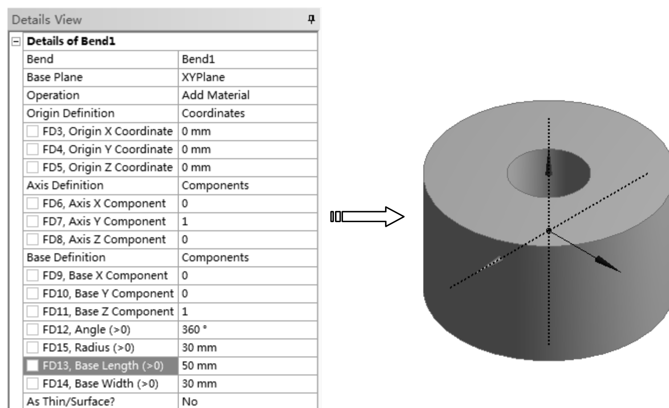


图 2-69　创建弯曲体

2.3.2　拉伸特征——Extrude

拉伸特征用于根据选定的草图轮廓线沿某一方向拉伸一定的长度创建实体特征。

选择【Create】|【Extrude】命令，然后选择所有拉伸草图，设置拉伸类型和长度，然后单击【Generate】按钮，生成拉伸特征，如图 2-70 所示。

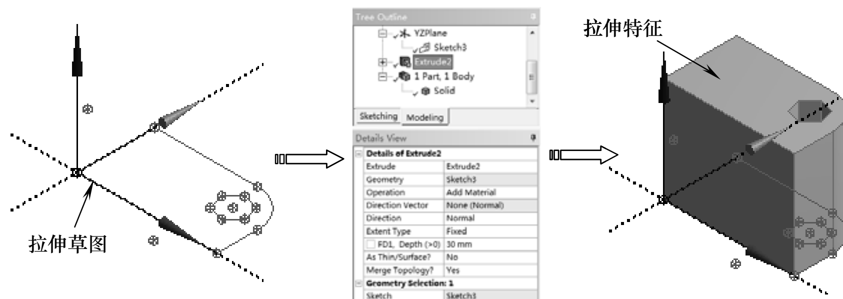


图 2-70　创建拉伸特征

在详细设置窗口中选项参数的含义如下：

（1）Extrude（拉伸名称） 用于设置拉伸名称，系统默认为 ExtrudeX，依次增加。

（2）Geometry（几何） 用于选择拉伸截面，可选择一个有效草图或者命名选择的面。

（3）Operation（操作） 用于选择拉伸操作类型，包括 Add Frozen（增加冻结体）、Add Material（增加材料）、Cut Materials（切除材料）、Imprint Faces（生成印记面）、Slice Material（切片材料）等。

- ✧ Add Frozen（增加冻结体）：和添加材料相似，但新增特征体不被合并到已有的模型中，而是作为冻结体加入，线体不能进行切除、印记和切片操作，如图 2-71 所示。
- ✧ Add Material（增加材料）：创建并合并到激活体中，如图 2-71 所示。

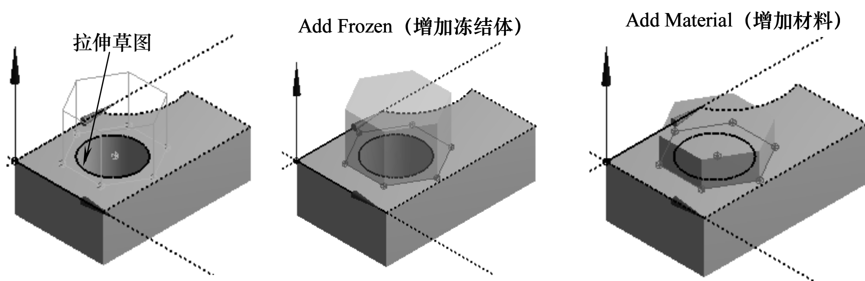


图 2-71　增加材料和增加冻结体

- ✧ Cut Materials（切除材料）：从激活体中切除材料，如图 2-72 所示。
- ✧ Imprint Faces（生成印记面）：与切片相似，但印记面仅分割体上的面，常用于在面的局部施加载荷和约束等，如图 2-72 所示。

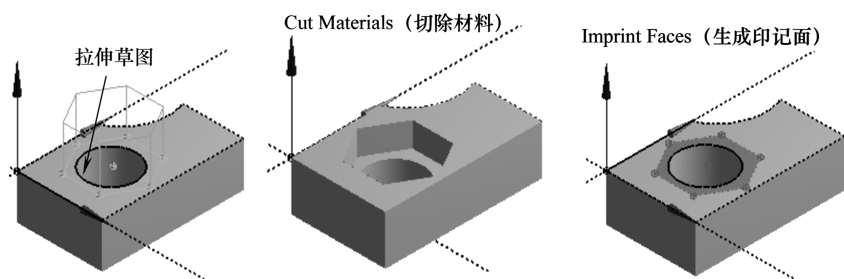


图 2-72　切除材料和生成印记面

- ✧ Slice Material（切片材料）：将冻结体切片，仅当体全部被冻结时才可用。

（4）Extent Type（延伸类型）

- ✧ Fixed（固定）：固定界线将使草图轮廓按指定的距离进行拉伸，特征预览精确地显示出创建特征后的情形。
- ✧ Through All（贯穿所有）：将截面延伸到整个模型，在添加材料操作中延伸轮廓必须完全和模型相交。
- ✧ To Next（到下一个）：在添加材料操作中，将轮廓延伸到所遇到的第一个面；在剪切、印记和切片操作中，将轮廓延伸至所遇到的第一个面或体。
- ✧ To Faces（到面）：可延伸拉伸特征到由一个或多个面形成的边界，对多个轮廓而言要确保每一个轮廓至少有一个面和延伸线相交。

✧ To Surface（到表面）：与 To Faces（到面）相似，但只能选择一个面，延伸长度可以由到所选表面的下一个并且有可能是无约束的面定义。

2.3.3　旋转特征——Revolve

旋转是指一个草图截面绕某一中心轴旋转指定的角度下得到的实体特征，对应于工程实际中的旋转特征形成的零件。

选择【Create】|【Revolve】命令，选择旋转草图，设置旋转类型和角度，然后单击【Generate】按钮，生成旋转特征，如图 2-73 所示。

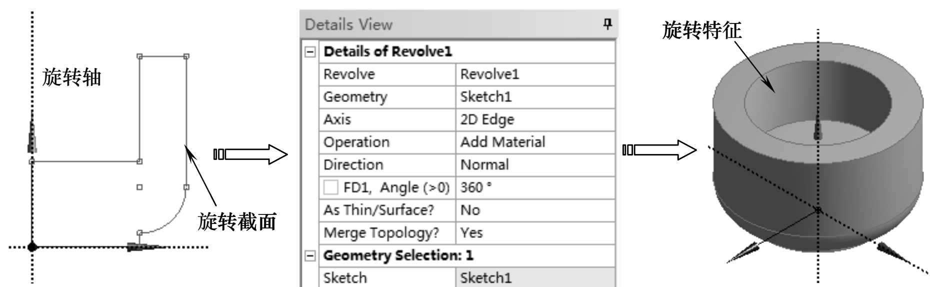


图 2-73　创建旋转特征

2.3.4　扫描特征——Sweep

扫描是草图轮廓沿着一条中心导向曲线扫掠来创建实体。通常轮廓使用封闭草图，而中心曲线可以是封闭的也可以是开放的。

选择【Create】|【Sweep】命令，再选择轮廓和路径，并设置相关参数，然后单击【Generate】按钮，生成扫描特征，如图 2-74 所示。

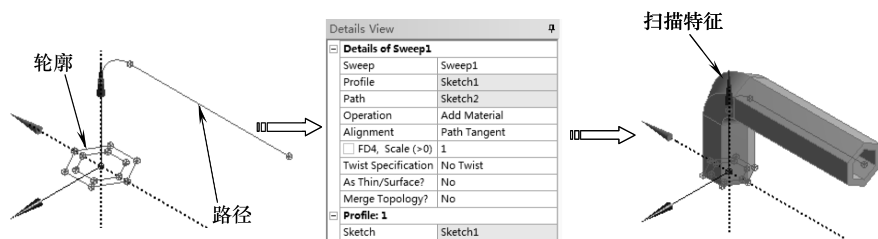


图 2-74　创建扫描特征

2.3.5　放样特征——Skin/Loft

放样特征是指两个或两个以上不同位置的封闭截面轮廓产生一个样条面拟合的三维几何体。

选择【Create】|【Skin/Loft】命令，按住<Ctrl>键选择多个轮廓，并设置相关参数，然后单击【Generate】按钮，生成放样特征，如图 2-75 所示。

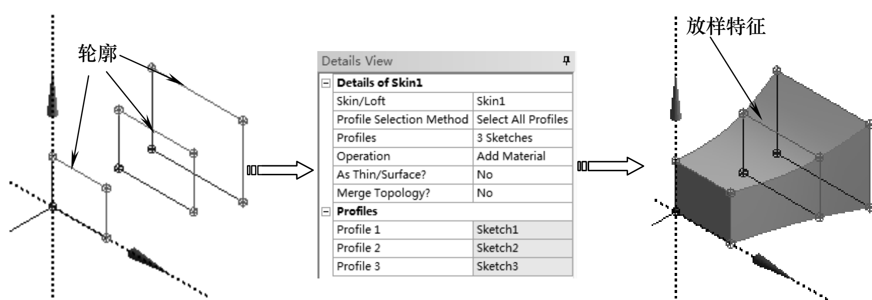


图 2-75　创建放样特征

2.4　实体特征编辑和操作

实体特征编辑和操作是指在已有基本实体的基础上建立如倒角、抽壳、阵列、布尔运算等特征。相关命令集中在【Create】下拉菜单下。下面分别加以介绍。

2.4.1　抽壳——Thin/Surface

【Thin/Surface】命令用于从实体内部除料或在外部加料，使实体中空化，从而形成具有薄壁特征的零件。

选择【Create】|【Thin/Surface】命令，在【Selection Type】下选择【Faces to Remove】方式，选择要移除的面，设置抽壳厚度，然后单击【Generate】按钮，生成抽壳特征，如图 2-76 所示。

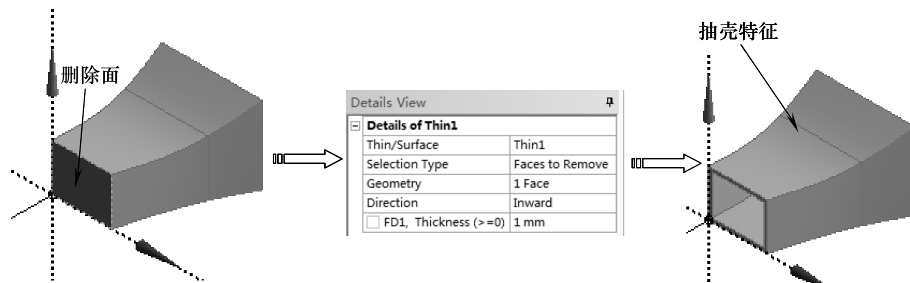


图 2-76　创建抽壳特征

其中，【Faces to Remove】是将所选面从体中删除；【Face to Keep】是指保留所选面，删除没有选择的面；【Bodies only】是指只对所选体进行操作，不删除任何面。

2.4.2　倒圆角特征

倒圆角有 3 种形式：Fixed Radius Blend（固定半径倒圆）、Variable Radius Blend（变半径倒圆）、Vertex Blend（顶点倒圆）。下面分别加以介绍。

1. Fixed Radius Blend（固定半径倒圆）

固定半径倒圆可以在模型边界上创建圆角，选择三维边用于倒圆角，如果选择面，则将面上的所有边进行倒圆。

选择【Create】|【Fixed Radius Blend】命令，再选择倒圆角边线，设置倒角半径，然后单击【Generate】按钮，生成固定半径倒圆特征，如图 2-77 所示。

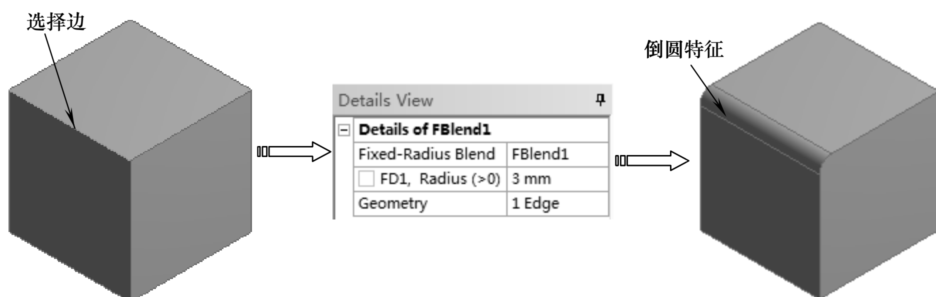


图 2-77　固定半径倒圆

2. Variable Radius Blend（变半径倒圆）

变半径倒圆是指在所选边线起始和结尾处设置不同圆角半径值的圆角，在两点间圆角可按“光滑”或“线性”规律变化。

选择【Create】|【Variable Radius Blend】命令，再选择倒圆角边线，设置圆角半径，然后单击【Generate】按钮，生成变半径倒圆特征，如图 2-78 所示。

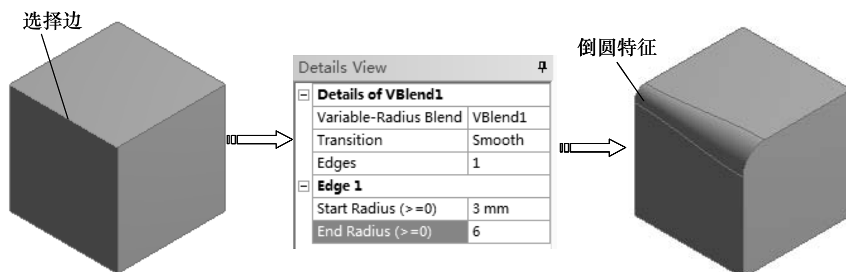


图 2-78　变半径倒圆

3. Vertex Blend（顶点倒圆）

顶点倒圆是指在面体和线体上的顶点倒圆角，但顶点必须和两条边相连，围绕顶点的几何模型必须共面。

2.4.3　倒角特征——Chamfer

倒角是指在存在交线的两个面上建立一个倒角斜面。

选择【Create】|【Chamfer】命令，再选择倒角边线，设置倒角尺寸，然后单击【Generate】按钮，生成倒角特征，如图 2-79 所示。

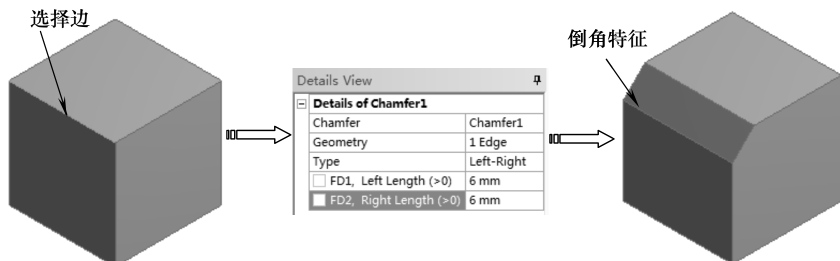


图 2-79　倒角特征

2.4.4 阵列特征——Pattern

阵列特征可以通过 Linear（线性）、Circular（环形）、Rectangular（矩形）等方式阵列特征。

选择【Create】|【Pattern】命令，再选择阵列方式和阵列实体对象，设置阵列方向和尺寸，然后单击【Generate】按钮，生成阵列特征，如图 2-80 所示。

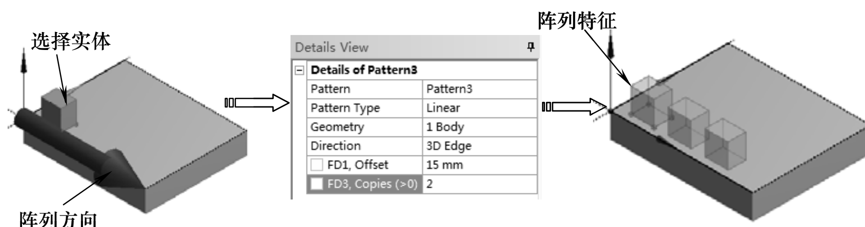


图 2-80 阵列特征

2.4.5 体操作特征——Body Operation

体操作特征可得到 11 种不同选项以对体进行操作，根据体是激活体还是冻结体，选项会不同。

选择【Create】|【Body Operation】命令，再选择特征操作方式和实体对象，设置操作参数，然后单击【Generate】按钮，生成体操作特征，如图 2-81 所示。

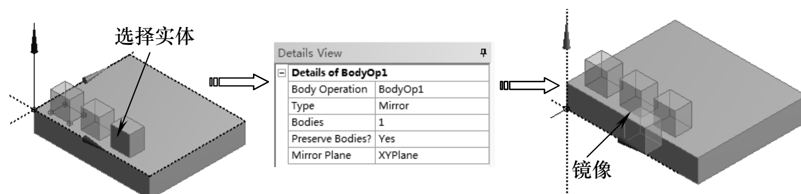


图 2-81 体操作特征

- ✧ Mirror（镜像）：将创建一个新体，是所选择体的镜像体，需要指定镜像平面。
- ✧ Move（移动）：移动所选体到指定位置，然后对齐体、源平面和目标平面。
- ✧ Delete（删除）：删除所选体。通过删除或抑制该操作，可以恢复删除体。
- ✧ Scale（缩放）：放大或缩小体。缩放原点可以是全局坐标系原点（World Origin）、所选体的形心（Body Centroid）、选定的点（Point）。
- ✧ Sew（缝合）：缝合所选面体形成一个体，选择【Create Solids】为 Yes，缝合闭合的曲面将会生成实体。
- ✧ Simplify（简化）：可使用几何或拓扑简化。
- ✧ Translate（平移）：将选择的体在指定方向平移，方向可以指定坐标，或指定某边和距离。
- ✧ Rotate（旋转）：指定轴和角度旋转所选的体，轴可以指定 x、y、z 分量或某条边。
- ✧ Slice Material（切片）：将一个体从另一个体上切分出来，当模型中所有体都是冻结体时有效。
- ✧ Cut Material（切除材料）：当模型中有激活体时，该选项有效，用于把选中的体从其

他激活体上切除。

✧ Imprint Face（印记面）：当模型中有激活体时，该选项有效，用于选中体在激活体上生成印记。

2.4.6　布尔运算——Boolean

布尔运算可进行体合并、体相减和体相交操作。

选择【Create】|【Boolean】命令，再选择布尔运算方式和实体对象，然后单击【Generate】按钮，生成布尔运算特征，如图 2-82 所示。

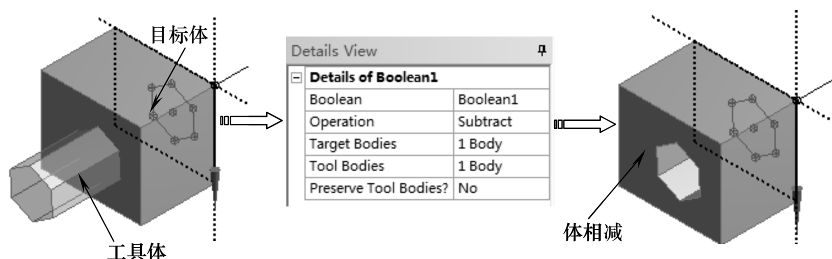


图 2-82　布尔运算

其中，体合并（Unite）将两个或多个体合并成一个体；体相减（Substract）用一个目标体减去另一个工具体；体相交（Intersect）创建两个实体相交。

2.4.7　切片特征——Slice

切片特征使用平面、面等切割实体，该命令仅用于冻结体。

选择【Create】|【Slice】命令，再选择切片方式和切割平面，然后单击【Generate】按钮，生成切片特征，如图 2-83 所示。

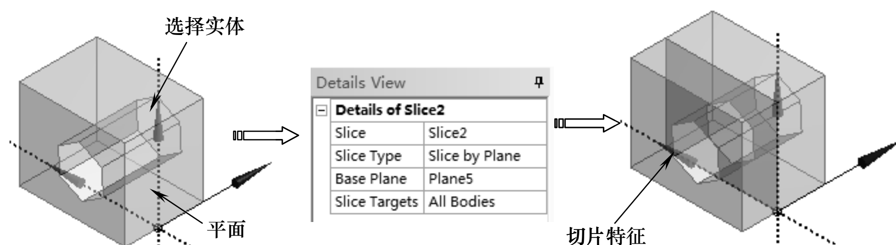


图 2-83　切片特征

2.4.8　面删除——Face Delete

面删除通过删除模型中的面，从而删除特征（如倒圆、倒角、孔），并自动在这些位置复原模型。

选择【Create】|【Face Delete】命令，再选择所有要删除的面（倒角面），单击详细列表窗口中的【Faces】选项下的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成面删除特征，如图 2-84 所示。

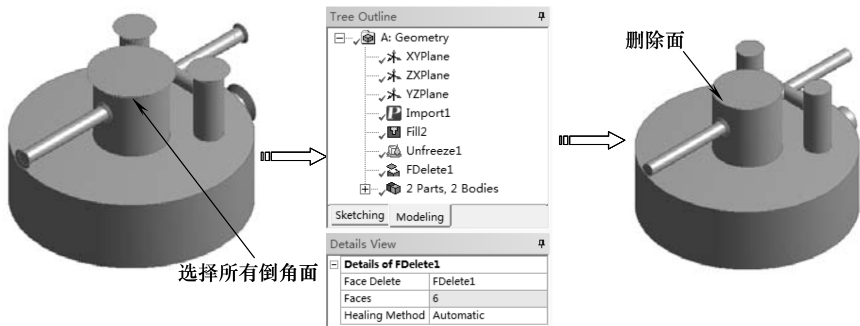


图 2-84　删除面

2.4.9　边删除——Edge Delete

边删除通过删除模型中的边，从而删除特征（如倒圆、倒角、孔），也可以应用到所有体类型上的印记边。

2.5　实体建模工具

实体建模工具包括激活和冻结体、抑制体、命名、包围、填充、对称、组合单个体等，相关命令集中在【Tools】下拉菜单下。下面分别加以介绍。

2.5.1　激活和冻结体——Unfreeze 和 Freeze

在 DesignModeler 中实体有两种状态体。

✧ Unfreeze（激活体）：在激活的状态，体可以进行常规的建模操作修改，激活体在设计树中显示为蓝色，而体在设计树中的图标取决于它的类型（实体、表面或线体）。
✧ Freeze（冻结体）：冻结体在建模中均不能操作，例如对冻结体的添加材料、切除材料、印记面等操作均将被忽略，只能进行切片（Slicing）。用冻结特征可将激活体转到冻结状态，选取对象后用解冻特征可激活冻结体。冻结体在设计树中显示为较淡颜色。

选择【Tools】|【Unfreeze】命令，再选择要解冻的体，单击详细列表窗口中的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，创建激活体，如图 2-85 所示。

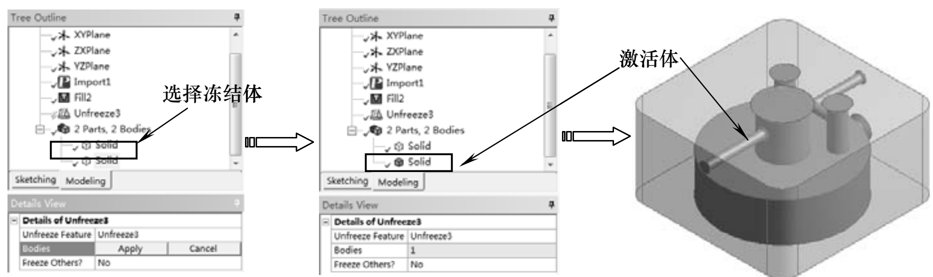


图 2-85　创建激活体

2.5.2　抑制体和取消——Suppress Body 和 Unsuppress Body

抑制体不显示在图形区中，它既不能送到其他 Workbench 模块中用于划分网格和分析，也不能导出到 Parasolid（.x_t）或 ANSYS Neutral（.anf）文件格式。抑制体在设计树中前面显示“X”符号。

在设计树中选择要抑制的体，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Suppress Body】命令，可将所选体抑制，如图 2-86 所示。反之，在设计树中选择抑制的体，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Unsuppress Body】命令，可将所选抑制体取消。



图 2-86　抑制体

2.5.3　命名选择——Named Selection

命名选择可以将特征进行分组，便于后续有限元分析中进行快速选择。

选择【Tools】|【Named Selection】命令，再选择面、体、边、点等要命名的对象，在 Details View 列表中设置名称，然后单击【Generate】按钮，生成命名如图 2-87 所示。

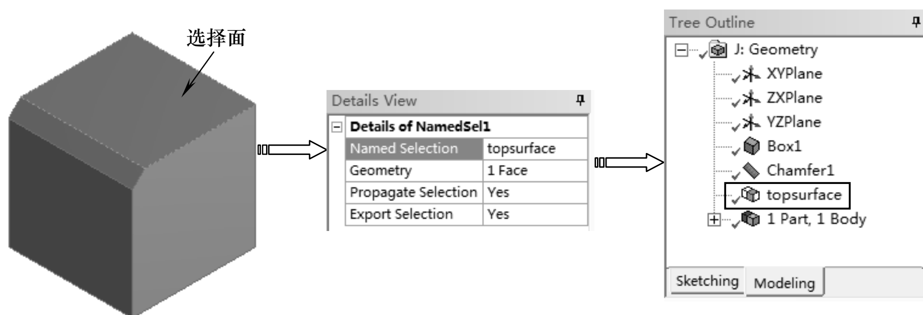


图 2-87　命名

2.5.4　中面——Mid-Surface

中面用于在已有实体之间抽取中间面。可创建多个面组的中面，多个面组可以在单次中面操作中选取，但是选择的面必须是相对的。在后续有限元分析中允许使用壳单元进行离散处理。

选择【Tools】|【Mid-Surface】命令，依次对称选择抽取中面的多对表面，然后单击【Generate】按钮，生成中面，如图 2-88 所示。

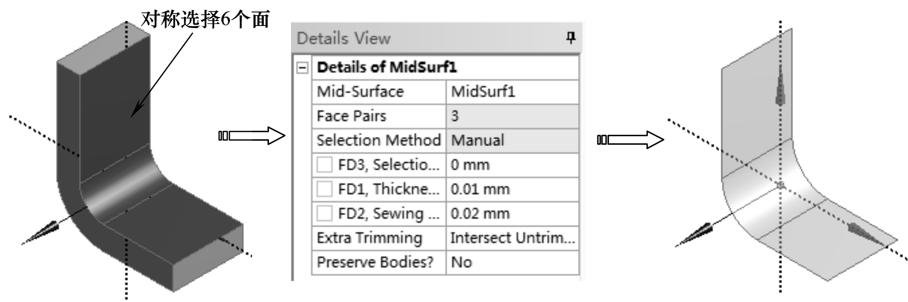


图 2-88　中面

2.5.5　包围——Enclosure

包围是指在体的附近创建周围的环绕区域，以便于模拟场区域（例如 CFD、EMAG 等）。可使用块体、球体、圆柱体或自定义的形状创建包围体，可通过【Target Bodies】选项将包围应用于所有的体或选择多的体，可通过【Merge Parts】选项对多体零件自动创建包围体，确保划分网格时原始零件和包围体有公共节点。

选择【Tools】|【Enclosure】命令，选择包围实体，单击详细设置窗口中的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成包围实体，如图 2-89 所示。

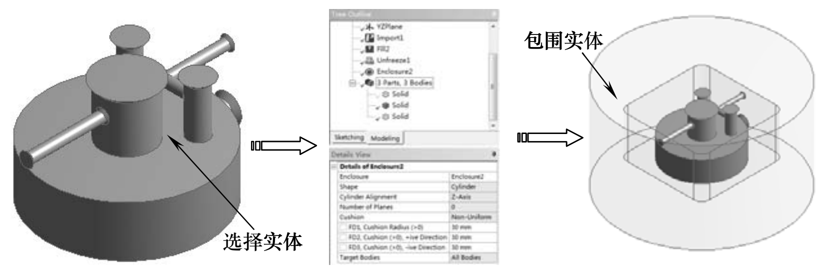


图 2-89　创建包围实体

2.5.6　对称——Symmetry

对称用于创建对称模型的简化模型，对称结果是用对称平面切分模型，输出结果为切分模型（位于轴正方向的部分保留下来，切除负半轴的材料）。

选择【Tools】|【Symmetry】命令，再选择对称平面，然后单击【Generate】按钮，生成对称实体，如图 2-90 所示。

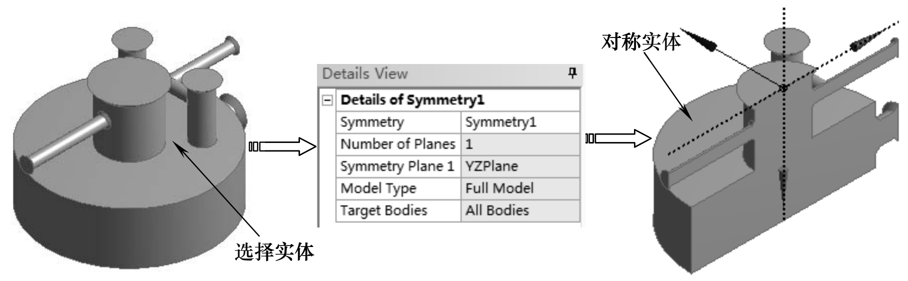


图 2-90　创建对称实体

2.5.7　填充——Fill

填充用于创建充满内部空腔的实体（冻结体），可在激活体或冻结体中进行操作，但只能在实体中进行操作。填充常用于 CFD 分析，它是通过指定空腔内部表面或创建封盖面完成的。

选择【Tools】|【Fill】命令，再选择所有空腔内表面（不用选择封口面），单击 Details View 列表中的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成填充实体，如图 2-91 所示。

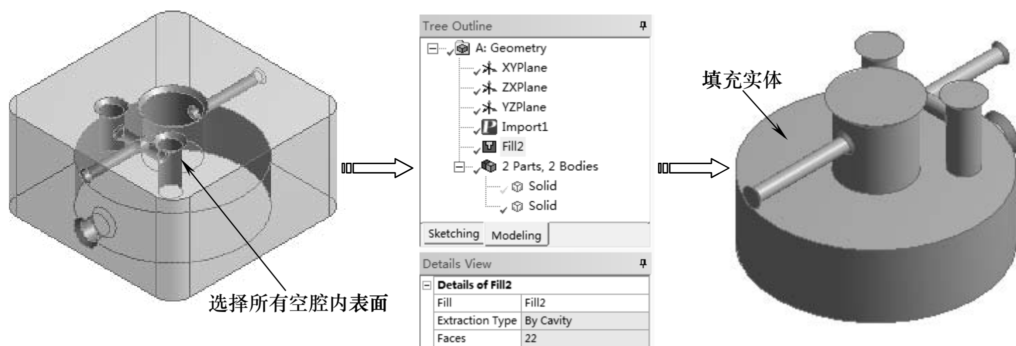


图 2-91　创建填充实体

2.5.8　组合单体零件——Form New Part

默认情况下，DM 将每一个体自动放入一个零件中，称为单体零件（Single-Body Parts）；可将多个体置于同一个零件中，称为多体零件（Multi-Body Part）。

多体零件具有多个零件（Part）和多个体（Body），每个体网格各自独立，它们在交接面上不具有共同的节点，如图 2-92 所示。

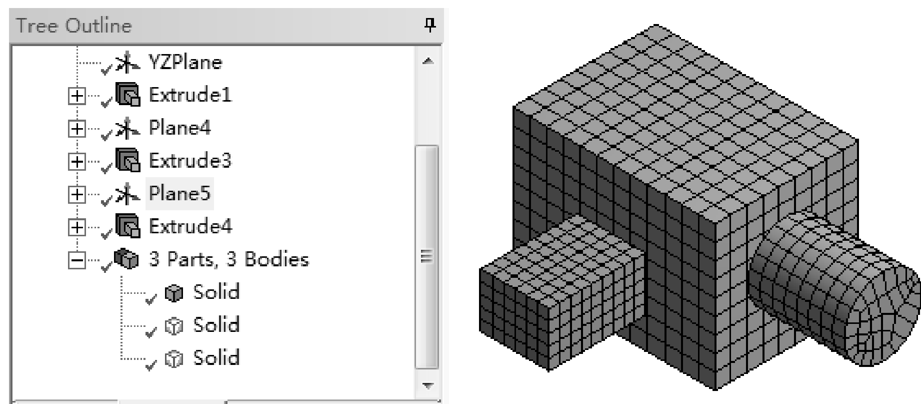


图 2-92　多体零件

单体零件具有一个零件（Part）和多个体（Body），所有体网格是一个整体，它们在交接面上具有共同的节点，如图 2-93 所示。

使用【Form New Part】命令可将体组合在一起，这些被组合在一起的零件称为一个 Part，它可以作为包含多个体且具有形状共同拓扑的零件进行分析。

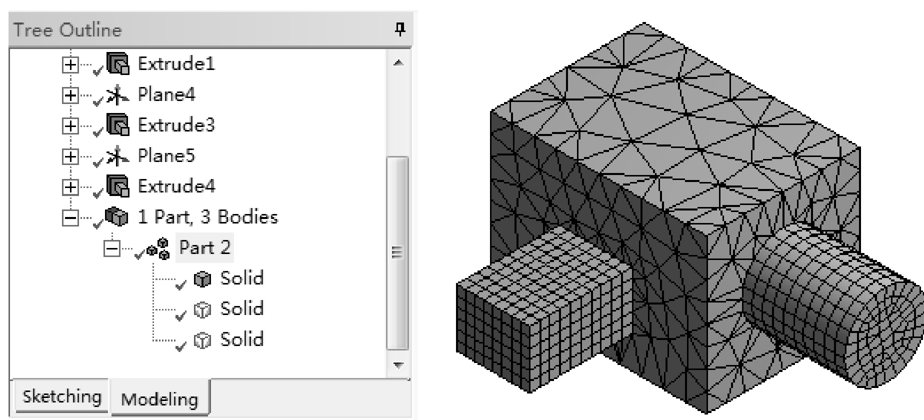


图 2-93　单体零件

在图形区选中两个或多个体，然后选择【Tools】|【Form New Part】命令，系统自动将多个体组合成单体零件，如图 2-94 所示。

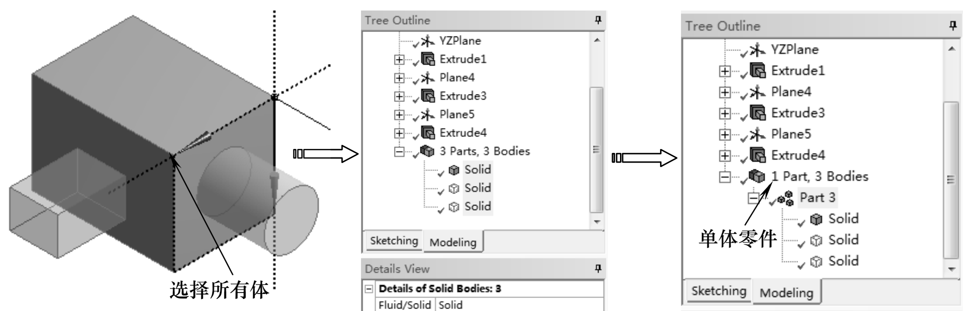


图 2-94　组合单体零件

2.6　概念建模

概念建模是 ANSYS Workbench 的特色，它在 DM 中实现对有限元中的梁和壳模型的建立和修改。在 DM 中通过建立线体并赋予其截面特征来作为有限元分析中的梁模型；通过建立面体作为有限元分析中的板壳模型。概念建模的相关命令集中在【Concept】下拉菜单下。下面分别加以介绍。

2.6.1　创建线体

线体用来生成结构分析中的有限元梁模型。在初始设计和整体分析阶段，花费较少的计算时间得到能够满足一般计算精度的计算结果是设计人员追求的目标，因而得到了广泛应用。

1. Lines From Points（从点生成线体）

从点生成线体是利用任何二维草图点、三维模型顶点或特征点来生成两点之间的直线。

选择【Concept】|【Lines From Points】命令，首先按住<Ctrl>键选择两个点来定义一条线，绿线表示要生成的线段，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】

按钮，系统自动生成线体，绿线变成了蓝线，如图 2-95 所示。

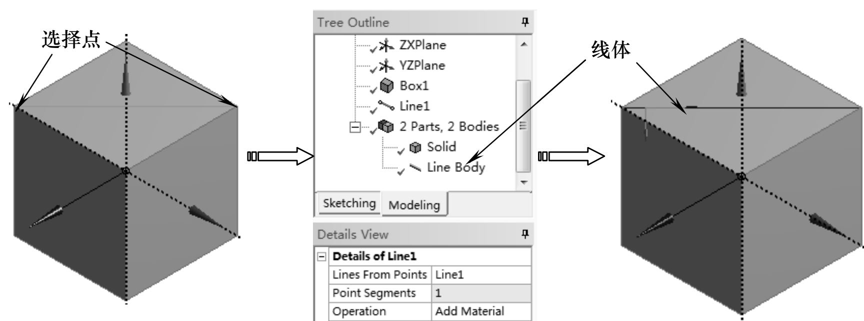


图 2-95　从点生成线体

2. Lines From Sketchs（从草图生成线体）

从草图生成线体是基于草图来创建线体。

选择【Concept】|【Lines From Sketchs】命令，再选择草图（按住<Ctrl>键可同时选择多个草图），所选择草图高亮显示，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成线体，如图 2-96 所示。

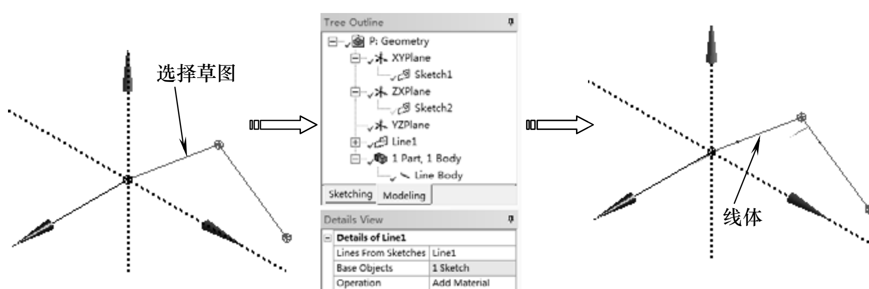


图 2-96　从草图生成线体

3. Lines From Edges（从边生成线体）

从边生成线体是基于已有的二维和三维模型边界创建线体。

选择【Concept】|【Lines From Edges】命令，再选择边或面，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成线体，如图 2-97 所示。

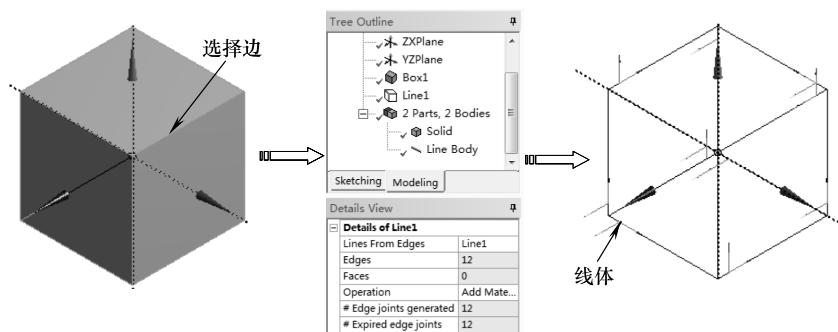


图 2-97　从边生成线体

4. 3D Curve（三维曲线）

三维曲线是从现有模型点或坐标文件中创建曲线。

选择【Concept】|【Lines From Points】命令，按住<Ctrl>键选择两个或多个点，绿线表示要生成的线段，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成线体，绿线变成了蓝线，如图 2-98 所示。

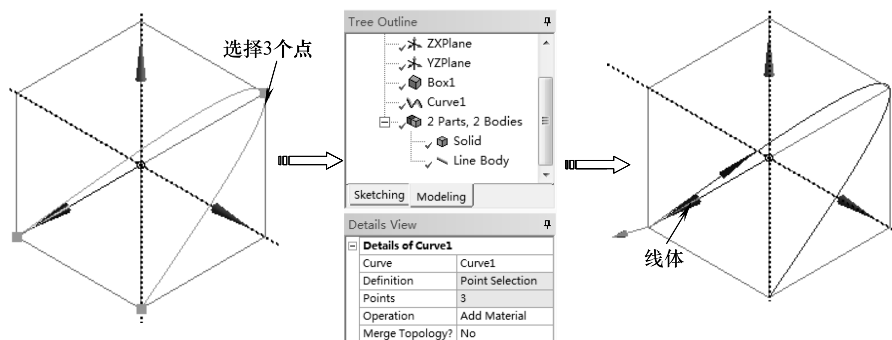


图 2-98　三维曲线

5. Split Edges（分割边）

分割边是指将线体分割成两部分，分割位置由分割属性控制。

选择【Concept】|【Split Edges】命令，再选择要分割的线体，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，设置分割参数（Fraction，0.5 表示中间分割），然后单击【Generate】按钮，系统自动完成分割，如图 2-99 所示。

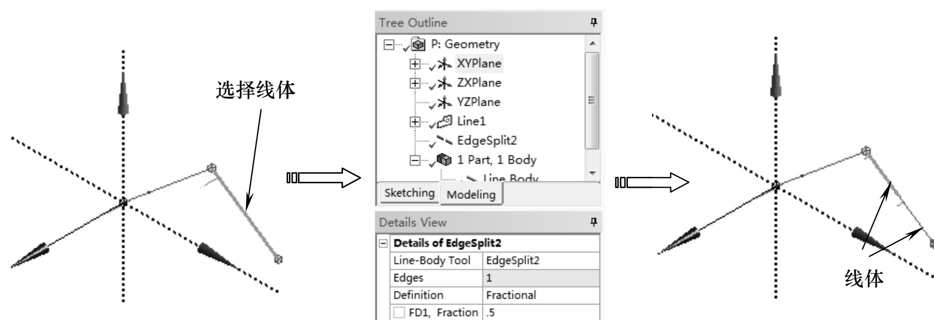


图 2-99　分割边

2.6.2　定义截面——Cross Section

截面是赋予线体的属性，用来定义有限元分析中梁的特性。在 DM 中，截面由草图表示，由一组尺寸控制。

1. 定义截面类型和尺寸

在【Concept】|【Cross Section】下选择所需的截面类型，设计树上出现【Cross Section】

选项，同时图形区出现截面草图，可在详细设置窗口中设置截面参数，如图 2-100 所示。

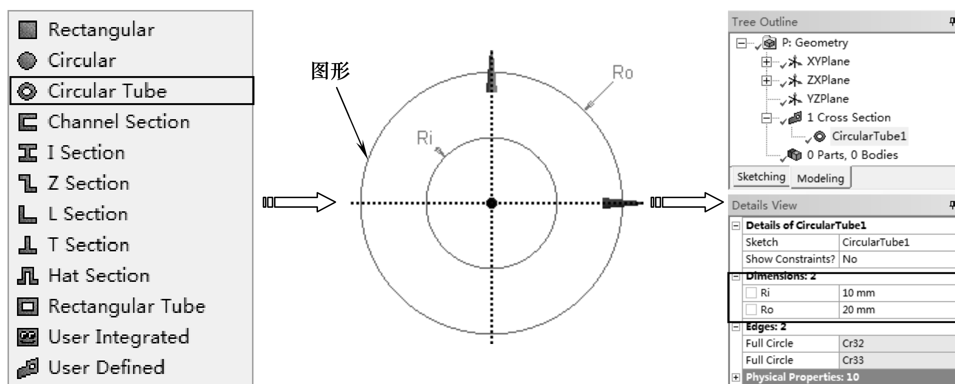


图 2-100　定义截面类型和尺寸

2．将截面赋给线体

在设计树中的【X Part，X Body】节点下选择【Line Body】节点，在详细设置窗口的【Cross Section】下选择截面类型，即可将截面赋给线体，如图 2-101 所示。

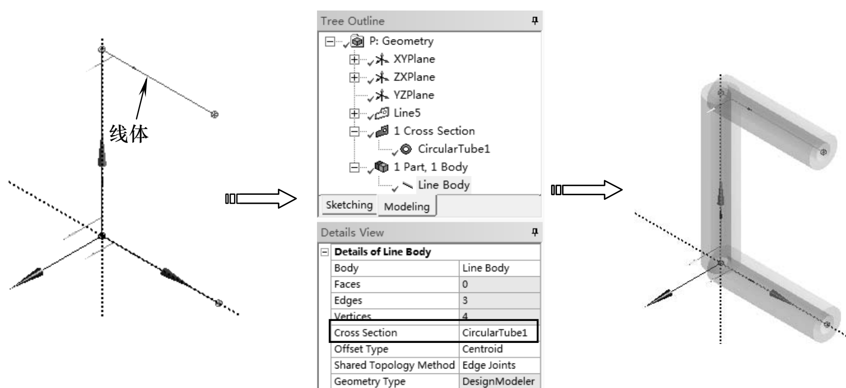


图 2-101　将截面赋给线体

提示：选择【View】|【Cross Section Solids】命令，使命令前出现对号标识，将在图形区显示所创建的模型。

2.6.3　绘制面体

在 DM 中创建的面体用于进行二维数值模拟，应用于平面应变、平面应力、轴对称，是在数值运算上比三维模型高效的模型。三维曲面用于数值模拟壳体模型。

1．Surfaces From Edges（从线创建面体）

从线创建面体是指以封闭线体作为边界创建面体。

选择【Concept】|【Surfaces From Edges】命令，再选择线体，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成面体，如图 2-102 所示。

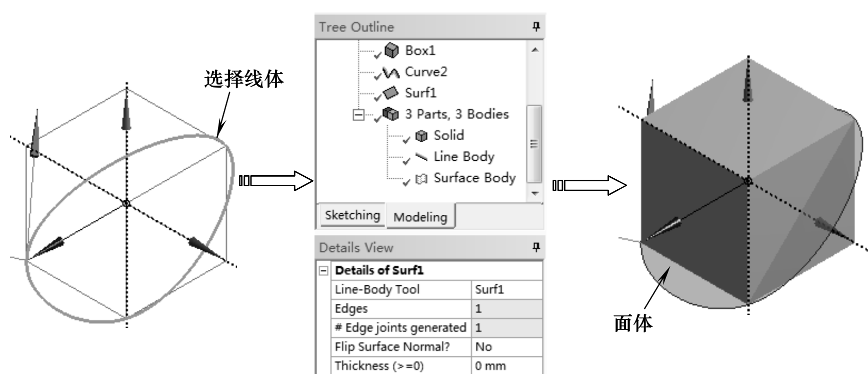


图 2-102　从线创建面体

注意：无截面属性线体能用于将面体连接在一起，在这种情况下线体仅仅起到确保面体有连续网格的作用。

2．Surfaces From Sketchs（从草图生成面体）

从草图生成面体是指以封闭草图作为边界创建面体。

选择【Concept】|【Surfaces From Sketchs】命令，再选择草图，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成面体，如图 2-103 所示。

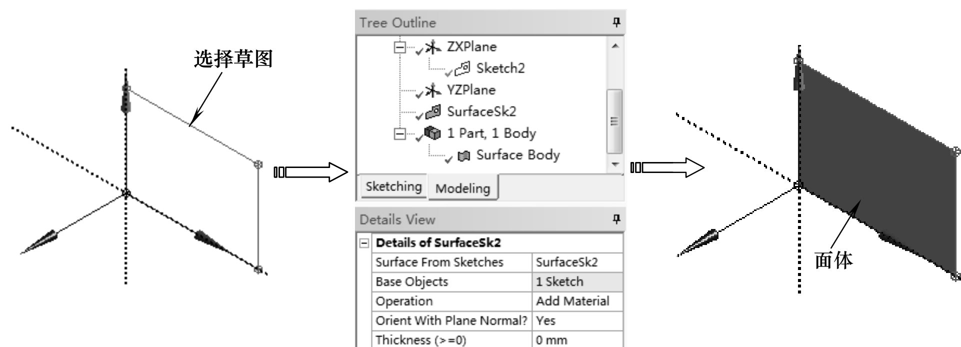


图 2-103　从草图生成面体

3．Surfaces From Faces（从面生成面体）

从面生成面体是指以所选择的面为边界创建面体。

选择【Concept】|【Surfaces From Faces】命令，再选择面，在详细设置窗口中单击【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成面体，如图 2-104 所示。

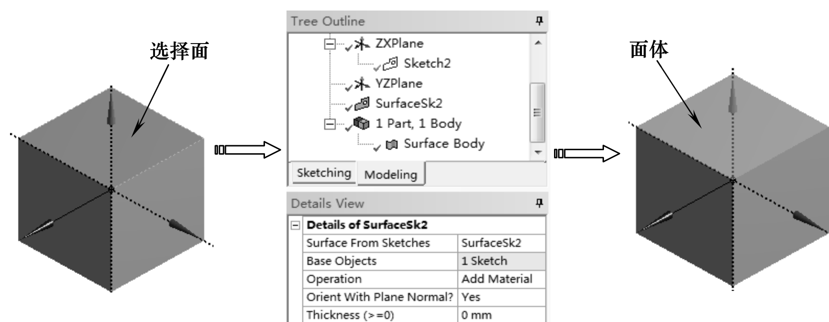


图 2-104　从面生成面体

2.7　参数化建模

参数是参数化建模的核心概念。在一个模型中，参数是通过“尺寸”的形式来体现的。参数化建模的特点在于可以通过变更参数的方法来方便地修改设计意图，从而达到修改设计作品的目的。ANSYS Workbench 在创建草图和特征时，它们的特性由“尺寸参考”来控制。尺寸参考可被提取为设计参数，它允许数据的参数化交换，使得 DM 模型更具有灵活性。

2.7.1　提取参数

创建草图和特征时，ANSYS Workbench 的 DM 由尺寸进行控制。在详细设置窗口中，将尺寸参考提取为设计参数“D”，可使用默认的名称，也可给定一个意义更加明确的名称（名称不能有空格，可以有下画线），如图 2-105 所示。

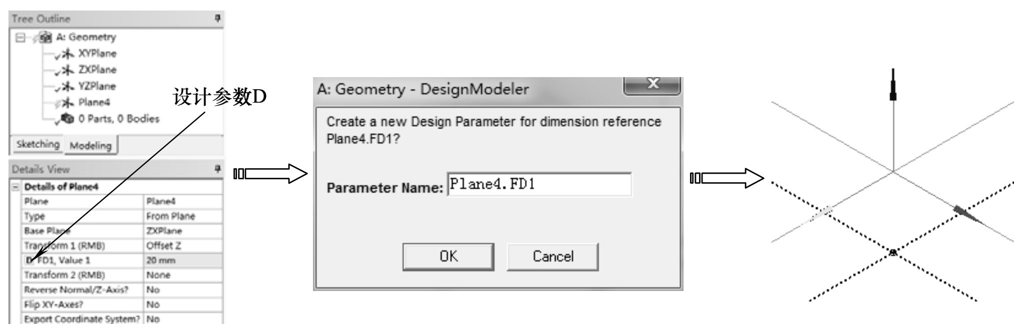


图 2-105　提取参数及参数命名

1．草图尺寸参数

在设计树中选中草图，然后在草图的详细设置窗口中单击要提取的尺寸，出现“D”后即可将尺寸提取为设计参数，此时弹出对话框，可输入设计参数名称（系统默认参数名称为“参考平面.尺寸类型与数值”），最后单击【OK】按钮完成，如图 2-106 所示。

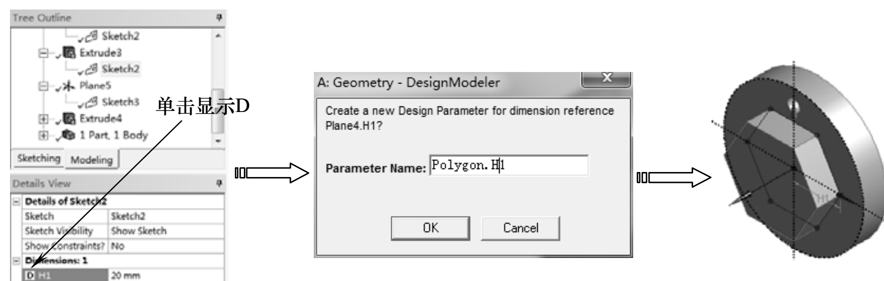


图 2-106　草图尺寸参数

2．特征尺寸参数

在设计树中选中特征，然后在特征的详细设置窗口中单击要提取的特征尺寸，出现“D”后即可将尺寸提取为设计参数，此时弹出对话框，可输入设计参数名称（系统默认参数名称为“特征名.尺寸类型与数值”），最后单击【OK】按钮完成，如图 2-107 所示。

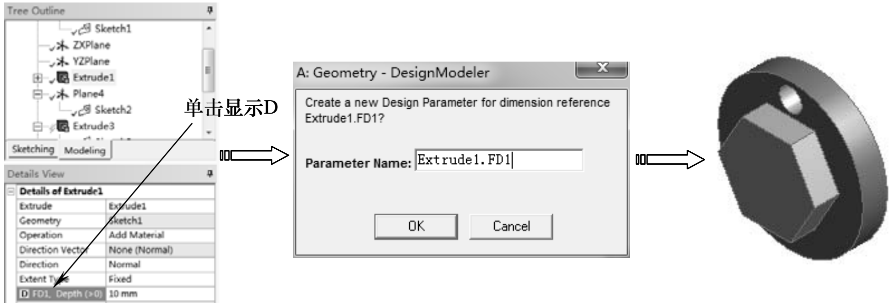


图 2-107　特征尺寸参数

2.7.2　参数管理器

参数管理器用于对参数进行管理，可单击工具栏上的【Parameters】按钮Parameters，在窗口下方打开参数管理器，如图 2-108 所示。

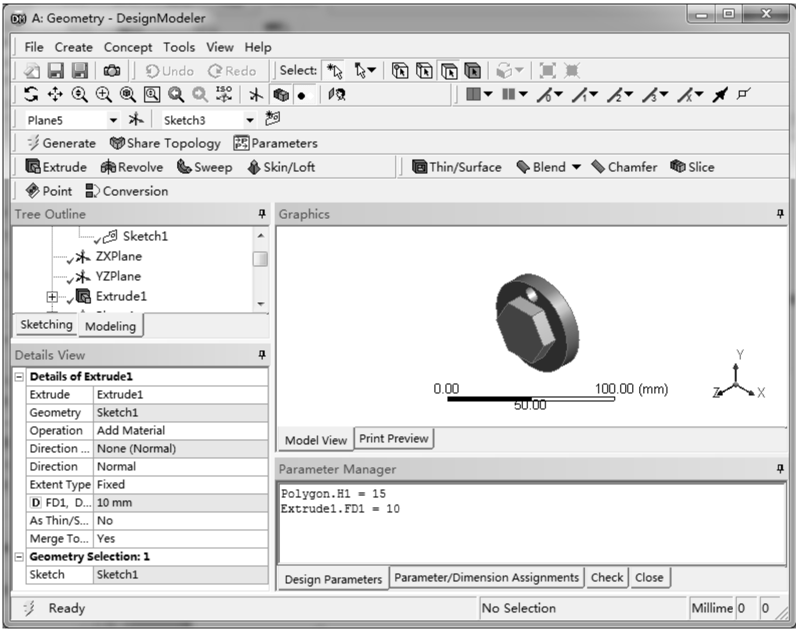


图 2-108　参数管理器

参数管理器共有 4 个选项卡，其中 3 个用于参数管理。

✧ Design Parameters（设计参数）：用于设计参数的浏览和赋值，各个设计参数在此处列出，可应用 “#” 对参数定义添加注释，如图 2-109 所示。

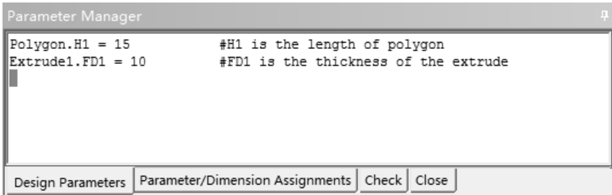


图 2-109　设计参数

✧ Parameter/Dimension Assignments（参数尺寸指定）：用于定义赋值表达式，以实现用设计参数驱动几何体模型尺寸，如图 2-110 所示。赋值表达式具有“参数=表达式”的形式，等式左边的参数可以是草图尺寸、特征尺寸或辅助变量，右边表达式是由+、–、*、/、( )、数值常量、草图尺寸、特征尺寸或辅助变量等构成的数学运算表单时，引用设计参数时需用前缀@。

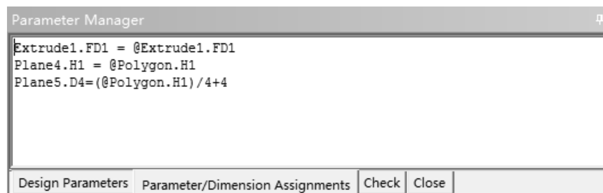


图 2-110　参数尺寸指定

✧ Check（检查）：用于计算和检查参数及表达式的值，如图 2-111 所示。

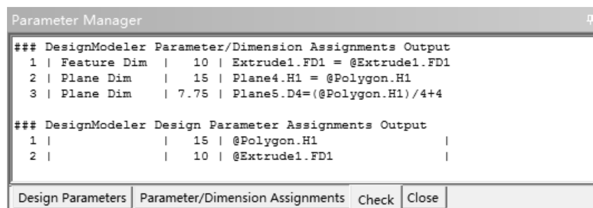


图 2-111　检查

2.8　CAD 数据导入 Workbench

除了利用 ANSYS Workbench 自身所带的 DesignModeler 模块建立几何模型外，还可以利用其他专业三维造型 CAD 软件，比如 Pro/Engineering、UG NX 等建立复杂的模型，再利用 DM 和三维软件的接口在三维软件中建立的模型导入 DM 环境中。

2.8.1　ANSYS Workbench 与 SolidWorks 集成设置

下面讲解 ANSYS Workbench 与三维软件集成设置。

1）选择【开始】|【所有程序】|【ANSYS 14.5】|【Utilities】|【CAD Configuration Manager 14.5】命令，弹出【ANSYS CAD Configuration Manager 14.5】窗口，如图 2-112 所示。

2）在【CAD Selection】选项卡中，选中【Workbench and ANSYS Geometry Interfaces】和【SolidWorks】复选框，如图 2-112 所示。

3）单击【CAD Configuration】选项卡，然后单击【Display Configuration Log file】按钮，显示出当前配置信息，如图 2-113 所示。

4）单击【Configure Selected CAD Interfaces】按钮，经过一段时间，会出现配置成功和失败信息，如图 2-114 所示。单击【Exit】按钮，退出【ANSYS CAD Configuration Manager 14.5】窗口。

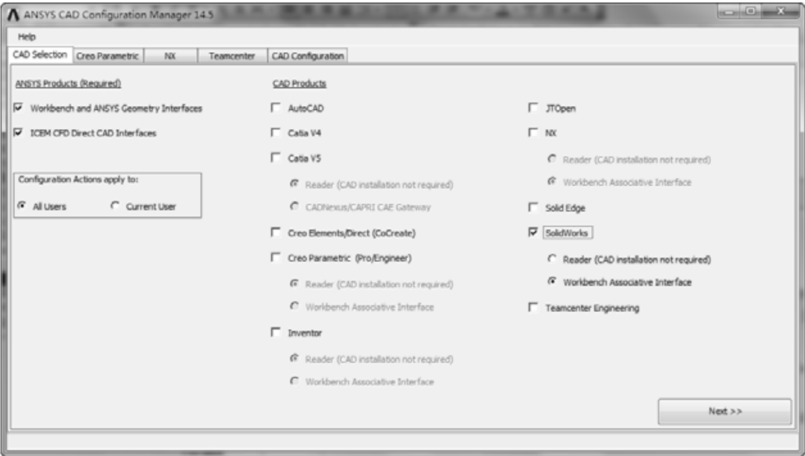


图 2-112 【ANSYS CAD Configuration Manager 14.5】窗口

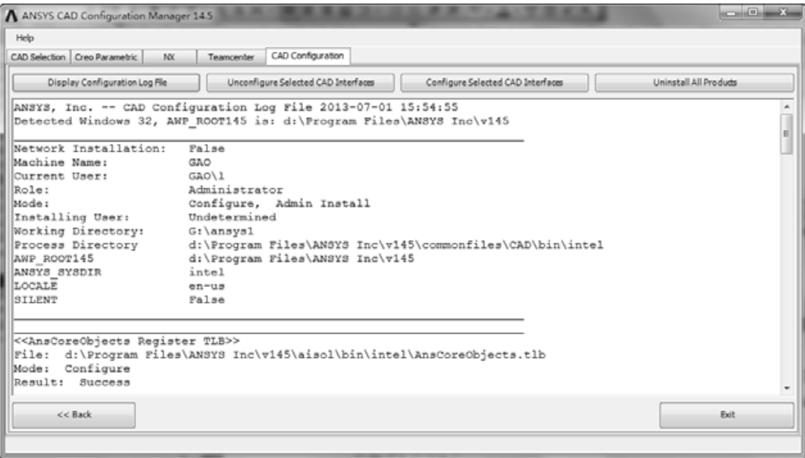


图 2-113 配置信息

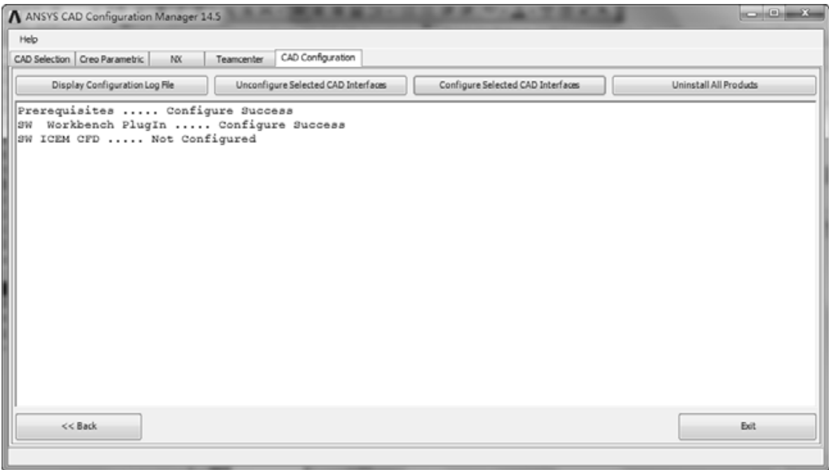


图 2-114 配置设置信息

5）启动 SolidWorks 软件，此时在窗口中出现【ANSYS 14.5】菜单，如图 2-115 所示。

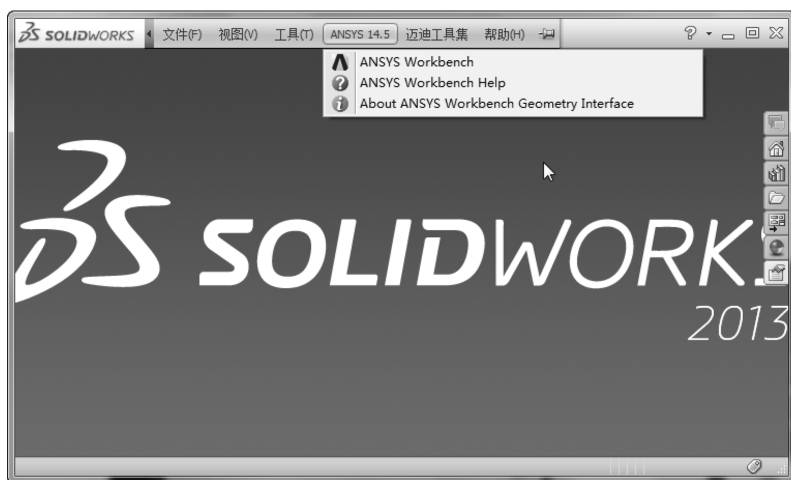


图 2-115　ANSYS Workbench 集成到 SolidWorks 中

2.8.2　直接读取模式

Workbench 提供了两种导入 CAD 模型的方法：通过【File】菜单下的【Import】命令、项目流程中的【Geometry】单元。

在项目流程中的【Geometry】栏上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 2-116 所示。系统弹出【打开】对话框，选择文件路径，导入 tank.igs 几何体文件，此时 A2 栏中【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加，如图 2-117 所示。

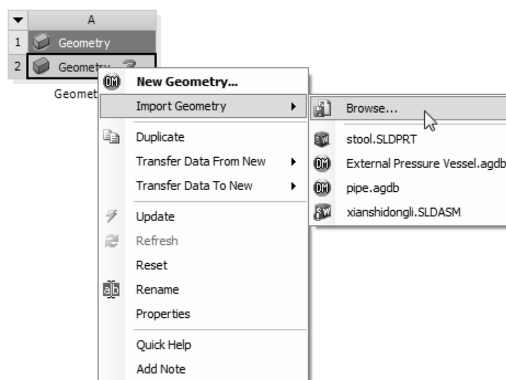


图 2-116　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

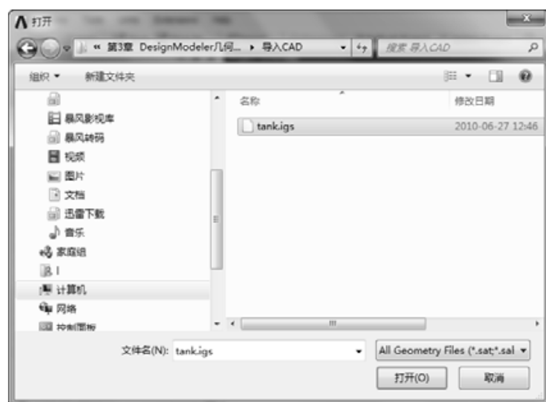


图 2-117　【打开】对话框

单击【打开】对话框右下角的【All Geometry Files】下拉按钮，即可看到 Workbench 支持多种标准格式导入，如图 2-118 所示。

双击项目中的【Geometry】栏，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 2-119 所示。

ACIS (*.sat;*.sab)
ANSYS Neutral File (*.anf)
AutoCAD (*.dwg;*.dxf)
BladeGen (*.bgd)
Catia [V4] (*.model;*.exp;*.session;*.dlv)
Catia [V5] (*.CATPart;*.CATProduct)
Creo Elements/Direct Modeling (*.pkg;*.bdl;*.ses;*.sda;*.sdp;*.sdac;*.sdpc)
Creo Parametric (*.prt*;*.asm*)
DesignModeler (*.agdb)
FE Modeler (*.fedb)
GAMBIT (*.dbs)
IGES (*.iges;*.igs)
Inventor (*.ipt;*.iam)
JTOpen (*.jt)
Monte Carlo N-Particle (*.mcnp)
NX (*.prt)
Parasolid (*.x_t;*.xmt_txt;*.x_b;*.xmt_bin)
Solid Edge (*.par;*.asm;*.psm;*.pwd)
SolidWorks (*.SLDPRT;*.SLDASM)
SpaceClaim (*.scdoc)
STEP (*.stp;*.step)
All Geometry Files (*.sat;*.sab;*.anf;*.dwg;*.dxf;*.bgd;*.agdb;*.model;*.exp;*.
All Files (*.*)

图 2-118　常用标准格式

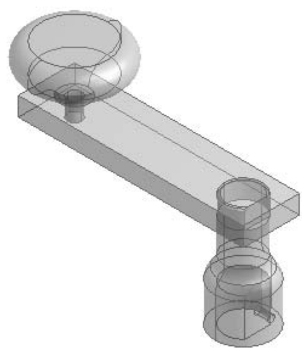


图 2-119　显示的模型

2.8.3　双向关联模式

从 CAD 软件下启动 Workbench 或者在 DM 中选择【File】|【Attach to Active CAD Geometry】命令，可与 CAD 模型进行双向连接，如图 2-120 所示。当外部 CAD 模型发生变化时，DesignModeler 中的模型只要刷新便可同步更新；同样，DesignModeler 中的模型发生变化时也只要通过刷新，则 CAD 中的模型也可同步更新。

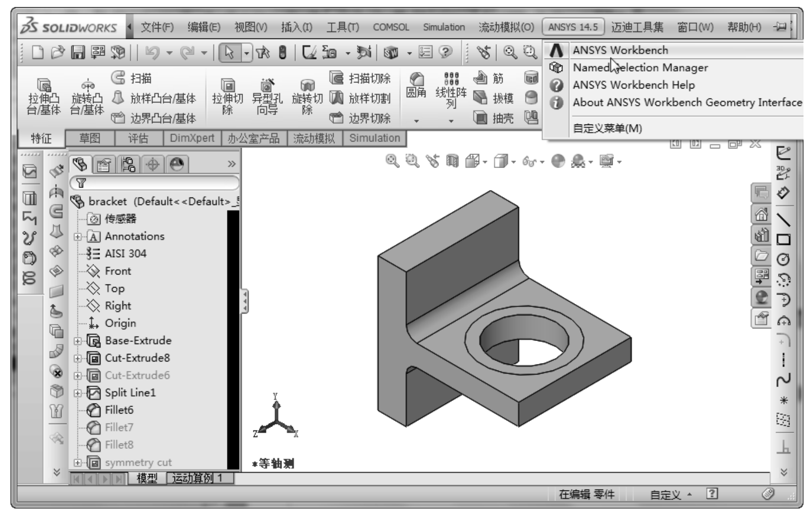


图 2-120　与 Solidworks 双向关联模式

有效双向连接的 CAD 程序有 UG NX、SolidWorks、CATIA、Creo、Inventor、Pro/Engineering 和 Solidedge 等。

2.9　本章小结

本章讲解了利用 ANSYS Workbench 软件中的 DesignModeler 模块建立几何模型的方法，包括二维草图、实体特征、实体特征编辑、概念建模、参数建模等。DesignModeler 模块建立简单的几何模型十分快捷，但面对稍微复杂的曲面模型或装配实体模型，建议采用专业 CAD 软件建模，然后导入 Workbench 中进行分析。

第 3 章 ANSYS 14.5 Workbench 建立有限元模型

建立有限元模型是有限元分析的必不可少的一部分，包括设置材料属性、网格划分等。本章将讲解 Engineering Data 材料属性设置、Meshing 网格划分技术，主要内容有网格划分界面、全局网格控制、局部网格控制、网格划分方法、网格工具等。

3.1 设置材料属性

在 ANSYS Workbench 中通过 Engineering Data 定义材料属性，它是每项工程分析的必要条件。作为分析项目的开始，Engineering Data 可在单独窗口打开并进行设置。

3.1.1 进入 Engineering Data 应用程序

进入 Engineering Data 应用程序有以下两种方法。

1. 双击【Engineering Data】选项

通过拖动或双击添加工具箱中的分析系统，然后双击【Engineering Data】选项，如图 3-1 所示。

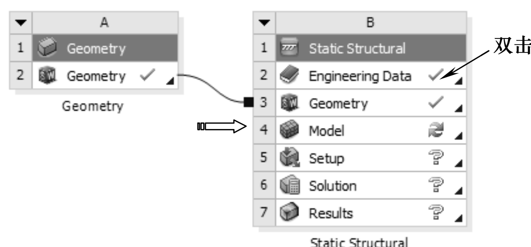


图 3-1 双击【Engineering Data】选项

2. 选择【Edit】命令

在分析项目【Engineering Data】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Edit】命令，如图 3-2 所示。

在 ANSYS Workbench 中材料属性的定义采用了集成的方式，进入 Engineering Data 应用程序后，窗口数据是相互式层叠显示的，如图 3-3 所示。

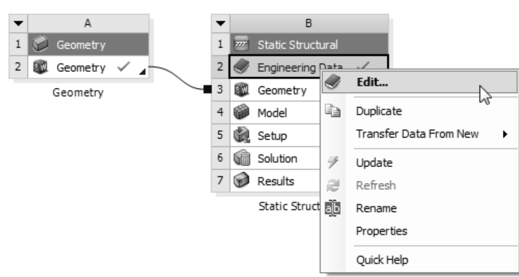


图 3-2 选择【Edit】命令

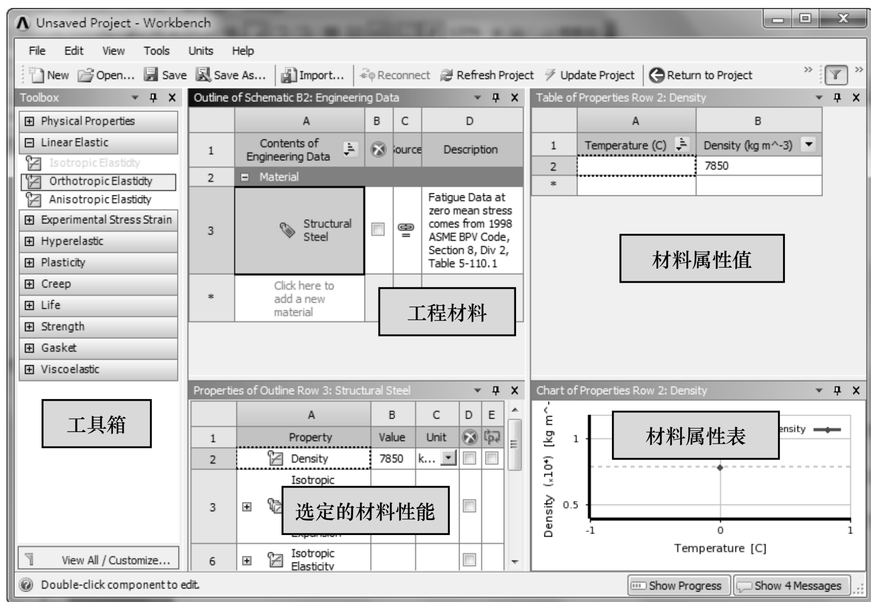


图 3-3 Engineering Data 应用程序界面

3.1.2 工程数据源和材料库

在 Engineering Data 应用程序窗口中任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources】（工程数据源）命令，如图 3-4 所示。

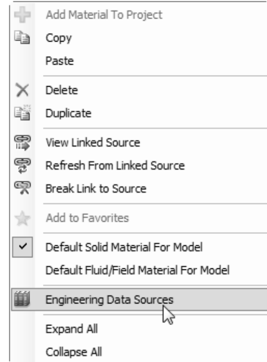


图 3-4 选择【Engineering Data Sources】命令

系统将会进入到【工程数据库】窗口，选中【Engineering Data Source】（工程数据源）窗口中的 A 列表中的【Data Source】中的【General Material】（基本材料），在【Outline of General Materials】（基本材料列表）中出现相应的材料库，如图 3-5 所示。

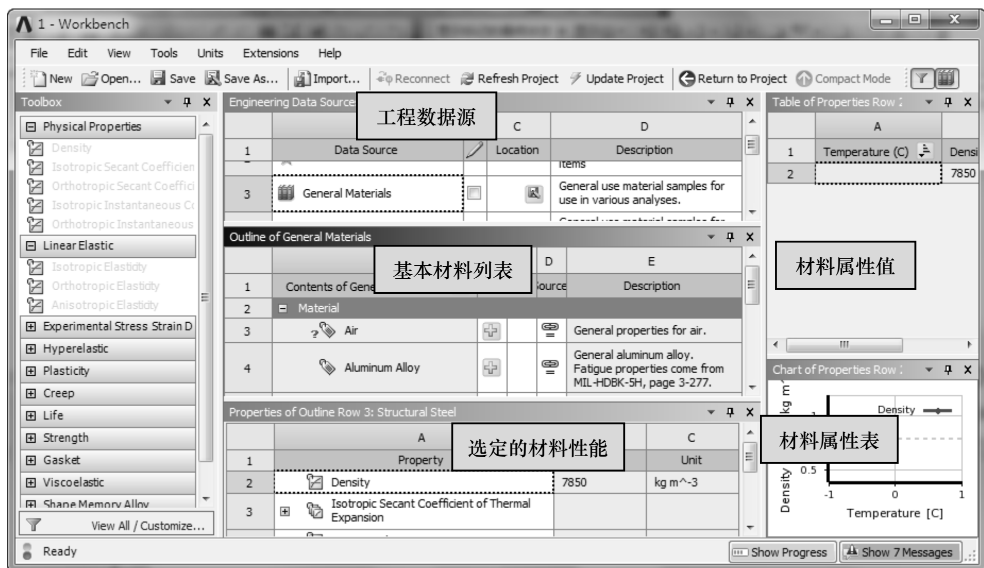


图 3-5　显示的【Engineering Data Sources】窗口

注意：如果【Engineering Data Sources】窗口中对话框排列位置混乱，可选择【View】|【Reset Workspace】命令重新排列。

1. Engineering Data Sources（工程数据源）

【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口显示材料库的清单，如图 3-6 所示。

Engineering Data Sources

	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
2	Favorites			Quick access list and default items
3	General Materials			General use material samples for use in various analyses.
4	General Non-linear Materials			General use material samples for use in non-linear analyses.
5	Explicit Materials			Material samples for use in an explicit anaylsis.
6	Hyperelastic Materials			Material stress-strain data samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves			B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials			Material samples specific for use in a thermal analysis.
9	Fluid Materials			Material samples specific for use in a fluid analysis.
*	Click here to add a new library		...	

图 3-6　【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口

- ✧ A 列 Data Source（数据源）：显示现有材料库的清单，这是 ANSYS 软件提供给系统的或用户自定义的材料库。其中，Favorites 是每个项目都有的，无须由材料库添加到分析项目。
- ✧ B 列（编辑锁定）：选中该复选框时，表示该材料库不能编辑，否则可对材料库进行编辑。

✧ C 列 Location（本地）：当 B 列处于解锁状态时，可以浏览现有材料或材料库的位置。

✧ D 列 Description（说明）：当前材料库的注释说明。

2. Outline of General Materials（基本材料列表）

【Outline of General Materials】（基本材料列表）材料库中包含大量常用材料数据，选中相应的材料，在选定的材料性能中可看到默认的材料属性值，该属性值可以修改，以符合选用的材料特性，如图 3-7 所示。

Outline of General Materials

	A	B	C	D	E
1	Contents of General Materials	Add		Source	Description
2	Material				
3	Air				General properties for air.
4	Aluminum Alloy				General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
5	Concrete				
6	Copper Alloy				
7	Gray Cast Iron				
8	Magnesium Alloy				

图 3-7 【Outline of General Materials】（基本材料列表）窗口

注意：读者可以自己定义材料库文件，扩展名为 xml，然后复制到 Workbench 的\Program Files\ANSYS Inc\v145\Addins\EngineeringData\MetaData\安装目录下即可。

3.1.3 添加现有材料

在项目分析中必须对模型赋予材料属性，而添加现有材料是材料设置的最简单和方便的方法。

1. 添加材料到分析项目

将现有材料库中的材料添加到当前分析项目中，需要在 Engineering Data 中的【Outline of General Materials（基本材料列表）】窗口单击材料后面 B 列中的【Add to B2：Engineering Data】按钮，此时在【Outline of General Materials（基本材料列表）】窗口中的 C 列显示为，表明材料已经添加到分析项目中，如图 3-8 所示。

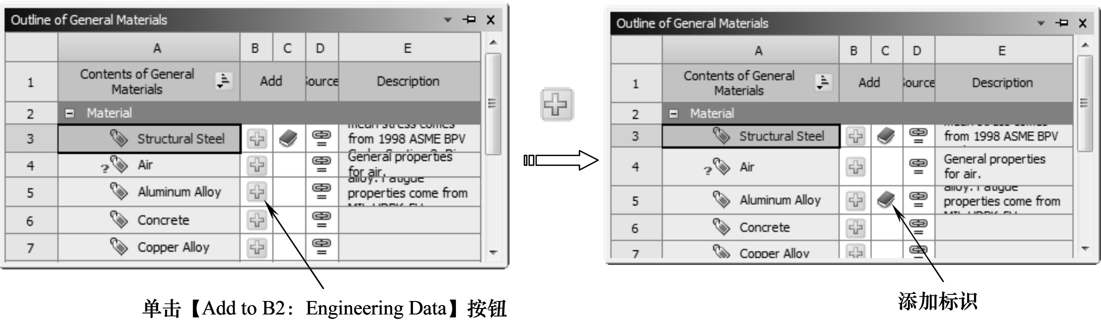


图 3-8 添加现有材料

选择的材料添加到分析项目中后，在【Outline of Schematic B2：Engineering Data（工程数据）】窗口中显示添加材料，如图 3-9 所示。

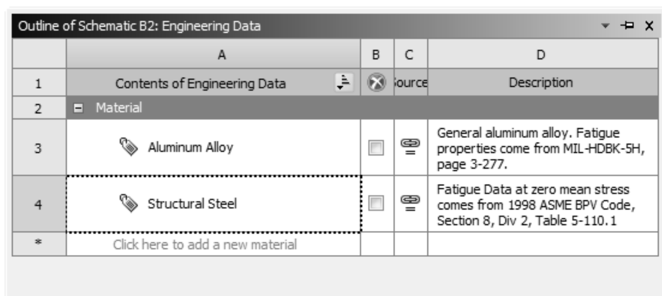


图 3-9　添加材料效果

2．添加材料到用户优先

如果需要将材料添加到 Favorites 中，方便以后分析过程中无须再添加此材料，则需要在相应的材料上右击，在弹出的快捷菜单中选择【Add to Favorites】命令，如图 3-10 所示。

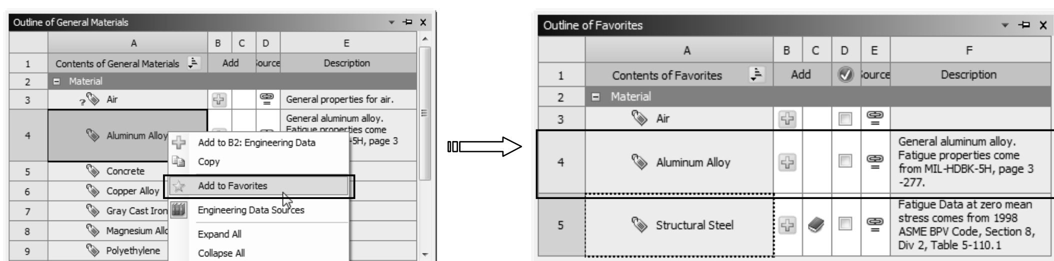


图 3-10　添加材料到 Favorites

3．编辑材料属性

在实际项目分析中往往需要对现有材料属性进行编辑和修改，以满足设计要求。下面以结构钢（Structural Steel）密度的修改为例来说明。

在【Outline of Schematic B2：Engineering Data（工程数据）】窗口中选中 Structural Steel 材料，如图 3-11 所示。

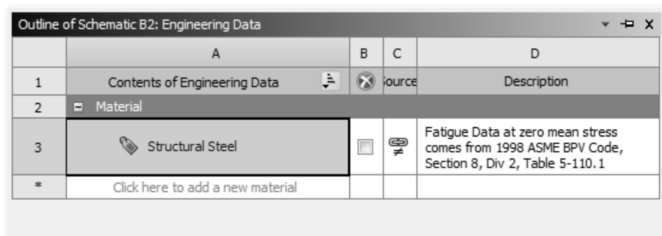


图 3-11　【Outline of Schematic B2：Engineering Data（工程数据）】窗口

此时，在【Properties of Outline Row 3：Structural Steel（选定材料的性能）】窗口列出材料的各种属性，如图 3-12 所示。该窗口共有 5 列：A 列为材料属性，如材料密度、弹性模量、泊松比等；B 列表示材料属性数值，可直接输入相关数据修改所选材料属性；C 列为材料属性单位，可通过下拉箭头修改单位；D 列表示在该材料中是否压缩或取消该属性值；E 列表示是否对材料属性参数化，如果选中☑，则该材料属性不能参数化或修改，因此在优化设计中对需要优化的参数应该不选。

Properties of Outline Row 3: Structural Steel

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	7900	kg m^-3		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
24	Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa		

图 3-12 【Properties of Outline Row 3：Structural Steel（选定材料的性能）】窗口

注意：需要修改材料属性时，现有的材料库必须要解锁，而且这是永久的修改，修改后的材料存储在该材料库中。对当前项目中的工程数据资料进行修改时不会影响材料库。

3.1.4 添加新材料库及材料属性

Engineering Data 中的工具箱提供了大量材料属性，通过工具箱可添加现有的或新的材料属性，如图 3-13 所示。

Toolbox
Physical Properties — 物理特性
Density
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion
Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion
Isotropic Instantaneous Coefficient of Thermal Expansion
Orthotropic Instantaneous Coefficient of Thermal Expansion
Linear Elastic — 线弹性
Isotropic Elasticity
Orthotropic Elasticity
Anisotropic Elasticity
Experimental Stress Strain Data — 实验应力应变数据
Hyperelastic — 超弹性
Plasticity — 塑性
Creep — 蠕变
Life — 寿命
Strength — 强度
Gasket — 衬垫
Viscoelastic — 滞弹性
Shape Memory Alloy — 形状记忆合金
Damage — 损伤

图 3-13 【Toolbox（工具箱）】

添加新材料库及材料属性的方法如下：

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B2 栏【Engineering Data】项，进入 Engineering Data 界面。

2）在 Engineering Data 应用程序窗口中任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，在出现的【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中单击【Click here to add a new library】选项，在空白处输入数据库名称（如 User Materials），如图 3-14 所示。

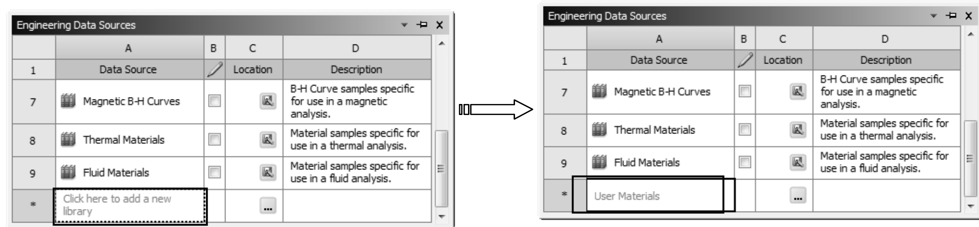


图 3-14　输入新数据库名称

3）输入完成后系统自动弹出【另存为】对话框，选择合适路径和文件名称后单击【保存】按钮保存数据库，如图 3-15 所示。

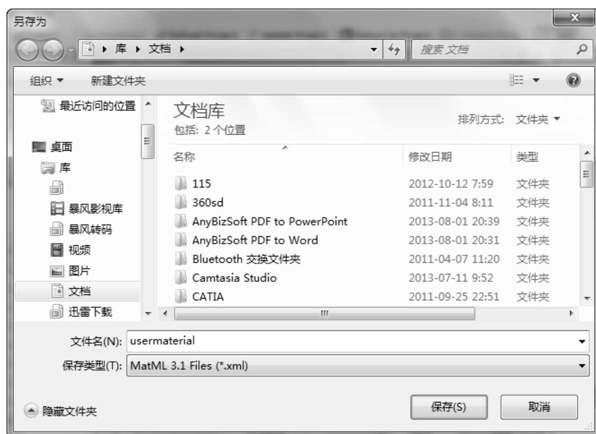


图 3-15　【另存为】对话框

4）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中新建的工程数据库 User Materials，在出现的【Outline of User Materials（用户材料列表）】窗口中单击【Click here to add a new material】选项，在空白处输入材料名称（如 LED chip），如图 3-16 所示。

5）在【Outline of User Materials（用户材料列表）】窗口中选中新建的材料 LED chip，出现【Properties of Outline Row 3：LED chip】窗口，在【Toolbox（工具箱）】中【Physical Properties】下的【Density】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，放开鼠标创建密度属性并输入属性值，如图 3-17 所示。

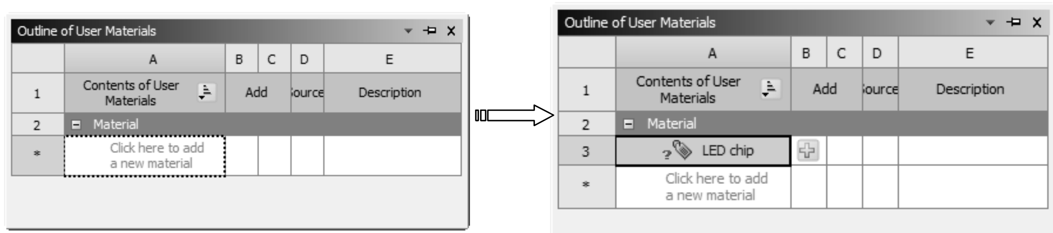


图 3-16　输入材料名称

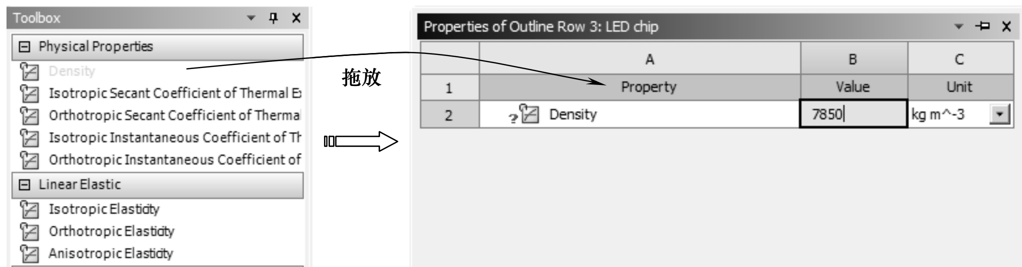


图 3-17　创建密度属性

6）同理，在【Toolbox（工具箱）】中【Linear Elastic】下的【Isotropic Elasticity】选项

上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，放开鼠标创建弹性属性并输入属性值，如图 3-18 所示。

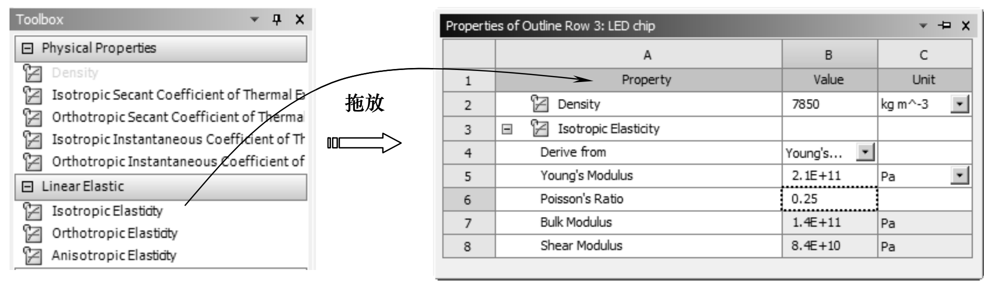


图 3-18　添加弹性属性

7）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口。单击【Return to Project】按钮 Return to Project，返回到项目管理区。

3.2　有限元网格概述

网格划分是有限元分析的关键步骤之一，有限元计算中只有网格的节点和单元参与计算，因此网格的疏密程度直接影响到计算结果的精度和正确性。

3.2.1　Workbench 网格划分界面——Meshing 界面

ANSYS Workbench 网格划分界面主要包括菜单栏、分析树、图形操作窗口、工具栏、详细设置窗口、状态栏等，如图 3-19 所示。

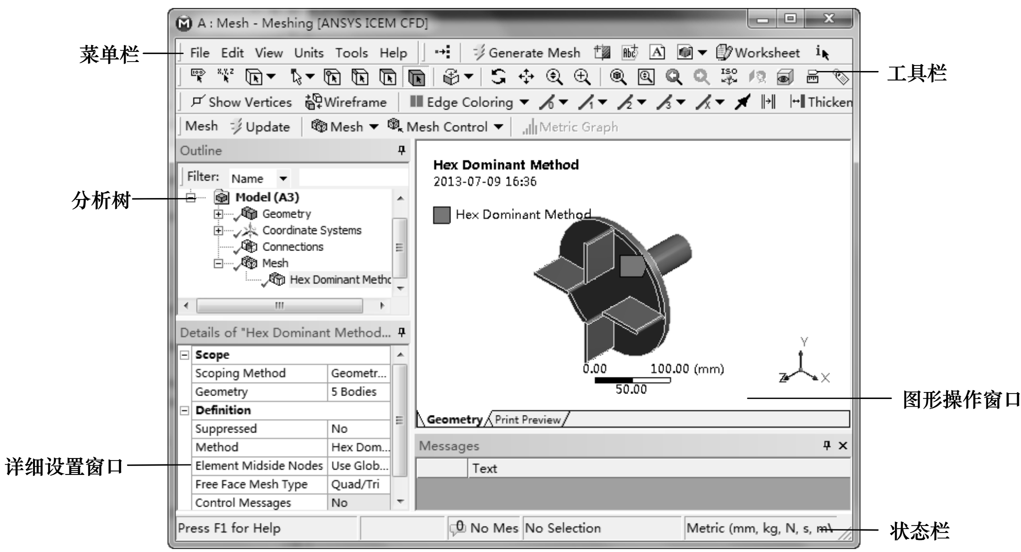


图 3-19　Meshing 用户界面

1. Meshing 中的菜单

Meshing 界面中常用的菜单命令如下：

（1）【File】菜单　【File】菜单用于进行文件操作，如图 3-20 所示。



图 3-20　【File】菜单

✧ Save Project（保存工程文件）：选择该命令可保存工程文件，保存类型为"Workbench Project Files（*.wbpj）"。
✧ Export（导出）：选择该命令，弹出【另存为】对话框，可选择想要的导出网格数据类型，包括"Meshing File（*.meshdat）""FLUENT Input File（*.msh）""POLYFLOW Input Files（*.poly）""CGNS Input Files（*.cgns）""ICEM CFD Input Files（*.prj）"和"TGrid Faceted Geometry File（*.tgf）"。
✧ Clear Generated Data（清除生成的数据）：选择该命令，清除生成的网格数据。
✧ Close Meshing（关闭界面）：选择该命令，关闭 Meshing 界面。

（2）【Edit】菜单　【Edit】菜单中包括对工程结果数据操作的编辑命令，如图 3-21 所示。

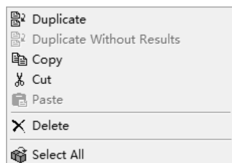


图 3-21　【Edit】菜单

✧ Duplicate（复制）：选择该命令，会将所选的数据复制一份，其名字后自动添加一位数字。
✧ Duplicate Without Results（不带结果文件的复制）：选择该命令，会将所选的数据复制一份，其名字后自动添加一位数字，但不复制结果数据。
✧ Copy（复制）和 Paste（粘贴）：两个命令联合使用，可在后处理操作中复制选中的后处理操作。
✧ Cut（剪切）：与 Paste（粘贴）命令联合使用，可在后处理操作中剪切掉选中的后处理操作，然后再次粘贴一个同样的后处理操作。
✧ Delete（删除）：选择该命令，将删除选中的后处理命令。
✧ Select All（选择所有）：选择该命令，将选择所有实体。

（3）【View】菜单　【View】菜单中包括对图形和窗口的各种显示命令，如图 3-22 所示。

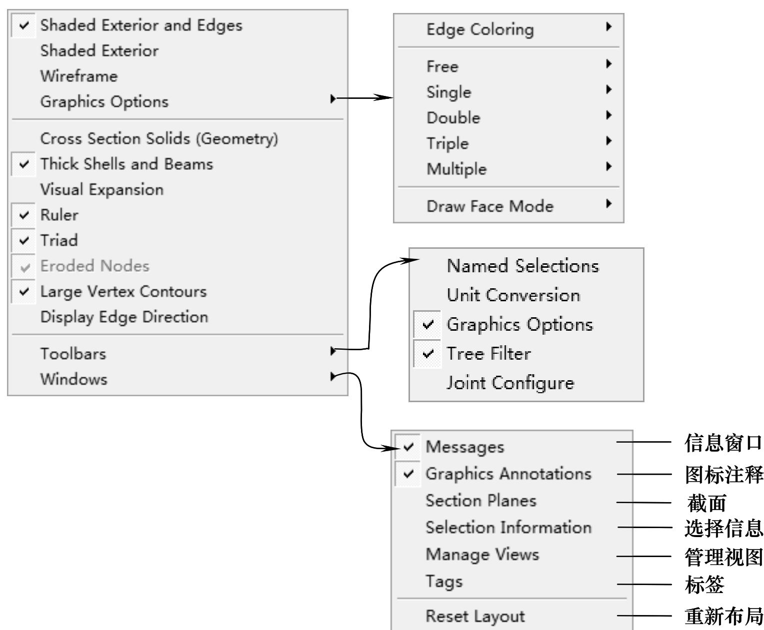


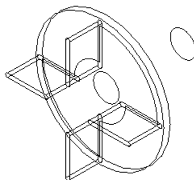
图 3-22　【View】菜单

【View】菜单中主要选项的含义如下。

✧ Shaded Exterior and Edges：选中该命令，显示图形外面和边，如图 3-23 所示。
✧ Shaded Exterior：选中该命令，显示图形外面，如图 3-24 所示。
✧ Wireframe：选中该命令，显示图形线框，如图 3-25 所示。


图 3-23 Shaded Exterior and Edges


图 3-24 Shaded Exterior


图 3-25 Wireframe

✧ Ruler：选中该命令，显示标尺，如图 3-26 所示。
✧ Triad：选中该命令，显示坐标系，如图 3-26 所示。

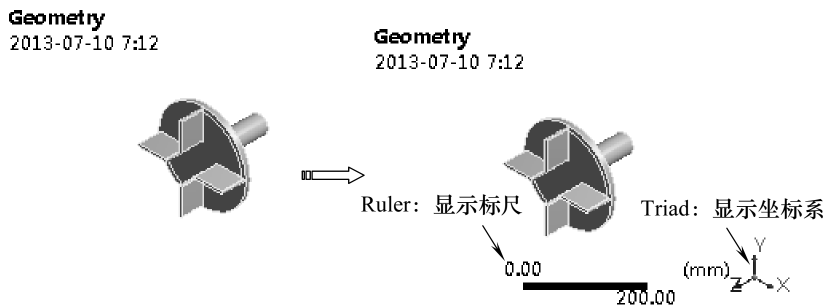


图 3-26 Ruler 和 Triad 示意图

（4）【Units】菜单 【Units】菜单用于选择需要的单位，如图 3-27 所示。

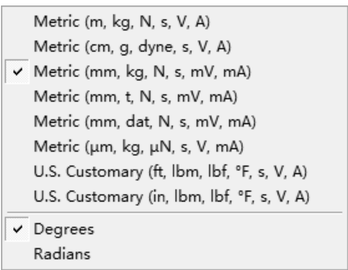


图 3-27 【Units】菜单

2. Meshing 工具栏

利用 Meshing 界面中的工具栏命令按钮启动命令是启动命令最方便的方法，下面介绍常用的 3 个工具栏。工具栏显示了常用的工具按钮，单击工具右侧的黑色三角，可展开下一级工具栏。

（1）【选择和视图】工具栏 【选择和视图】工具栏命令用于图形选择和视图操作，如图 3-28 所示。

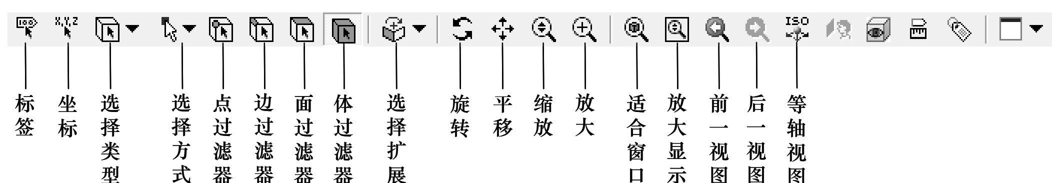


图 3-28　【选择和视图】工具栏

（2）【显示】工具栏　【显示】工具栏中的命令用于图形显示操作，如图 3-29 所示。

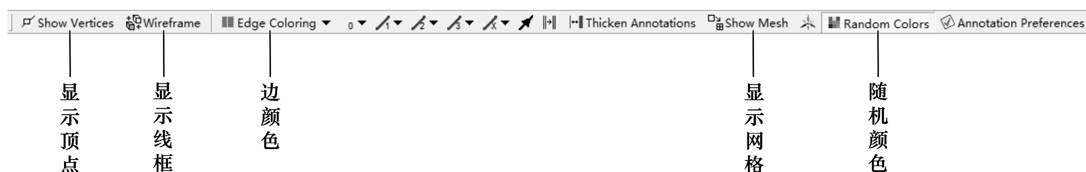


图 3-29　【显示】工具栏

（3）【Mesh】工具栏　【Mesh】工具栏中的命令用于网格划分和网格生成，如图 3-30 所示。

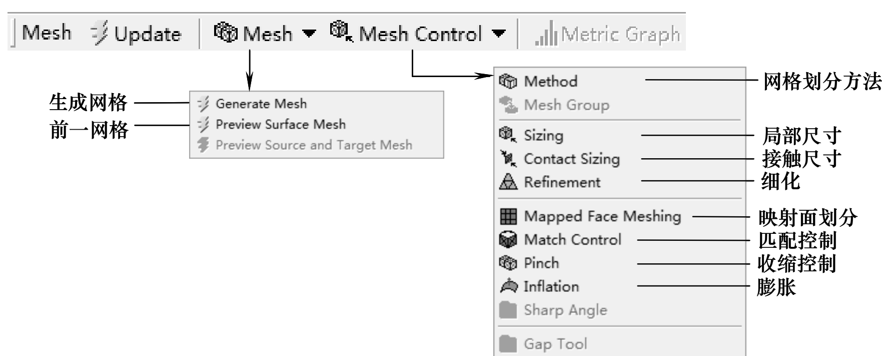


图 3-30　【Mesh】工具栏

3．图形操作窗口

图形操作窗口是图形显示和操作的主要界面，包括【Geometry】和【Print Preview】窗口，如图 3-31 所示。

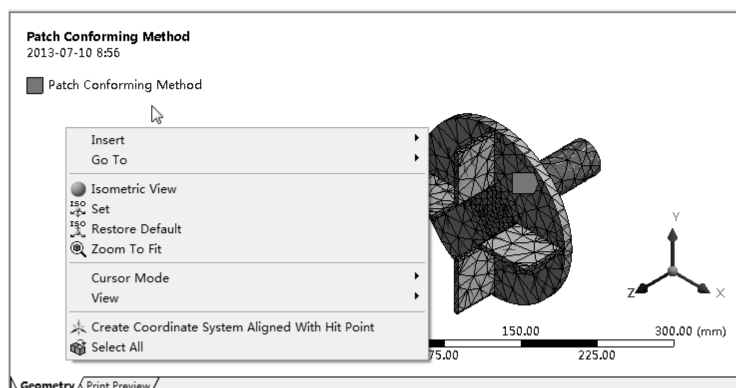
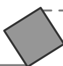


图 3-31　图形操作窗口



（1）【Geometry】窗口　Meshing 界面启动后的默认窗口，也是几何分析过程中最常使用的窗口，在窗口中可完成一系列网格剖分和边界条件施加等操作。

（2）【Print Preview】窗口　用于打印前预先显示几何图形。

在图形窗口中单击鼠标右键，弹出快捷菜单，通过快捷菜单可快速实现各种操作，主要命令有：

✧ Insert（插入）：用于插入 Method、Sizing、Contact Sizing、Refinement、Mapped Face Meshing、Match Control、Pinch、Inflation 等。
✧ Go To（去向）：用于将当前操作转到 Unmeshed Bodies（未网格化几何体）和 Bodies With One Element Through the Thickness（通过加厚创建一个单元）。
✧ Isometric View（等轴测视图）：用于将当前视图方向转到等轴测视图方向。
✧ Set（设置）：与 Isometric View（等轴测视图）命令相当。
✧ Restore Default（恢复到默认状态）：用于将当前视图状态恢复到默认的视图状态。
✧ Zoom To Fit（缩放到合适窗口大小）：用于将实体缩放到适合当前窗口的尺寸。
✧ Cursor Mode（光标模式）：用于设置鼠标选择过滤方式。
✧ View（视图）：图形窗口方向的视图选择，如前视图、后视图、左视图、右视图等基本视图选择。
✧ Select All（全选）：选择窗口中的所有实体。

4．分析树

窗口左侧为 Outline 分析树，分析树从上到下显示有限元分析的过程，在分析树中选择某个节点，将出现详细设置窗口（属性窗口），如图 3-32 所示。

（1）【Project】详细设置窗口　单击分析树 Outline 中的【Project】图标，显示【Details of “Project”】窗口，如图 3-32 所示。

✧ Title Page（标题页）：用于添加作者（Author）、主题（Subject）、准备（Prepared for）等。
✧ Information（信息）：包括显示的第一次保存时间（First Saved）、最后一次保存时间（Last Saved）和软件版本号（Product Version）。
✧ Project Data Management（工程数据管理）：设置工程文件的保存方式选项，包括求解之前保存工程文件（Save Project Before Solution）和求解之后保存工程文件（Save Project After Solution）。

（2）【Model】详细设置窗口　单击分析树 Outline 中的【Model】图标，显示【Details of “Model”】窗口，如图 3-33 所示。

✧ Ambient（环境）：设置环境光线度，数值为 0～1。
✧ Diffuse（扩散）：设置扩散度，数值为 0～1。
✧ Specular（镜面）：设置镜面光亮度，数值为 0～1。
✧ Color（颜色）：设置几何模型的颜色，单击其后面的按钮，可在【颜色】对话框中选择所需颜色。

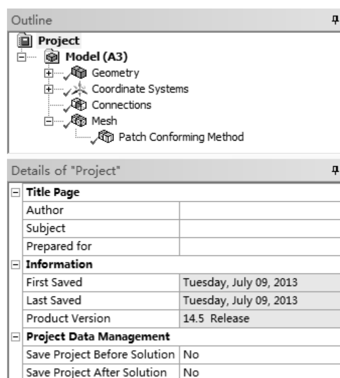


图 3-32 【Project】详细设置窗口

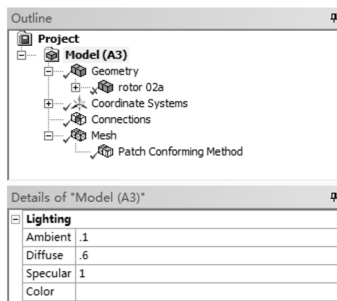


图 3-33 【Model】详细设置窗口

（3）【Geometry】详细设置窗口　单击分析树 Outline 中的【Geometry】图标，显示【Details of “Geometry”】窗口，如图 3-34 所示。

✧ Definition（定义）：定义包括文件放置位置（Source）、几何平台类型（Type）、长度单位（Millimeters）。
✧ Bounding Box（边界盒）：包括 X、Y、Z 三个坐标上的长度。
✧ Properties（属性）：用于设置几何模型体积（Volume）和几何比例因子（Scale Factor Value）。Scale Factor Value 系统默认为 1，可输入需要的数值，但仅限于等比例缩放。
✧ Statistics（统计）：包括实体数量（Bodies）、激活实体数量（Active Bodies）、节点（Nodes）、单元数（Elements）和网格度量（Mesh Metric）。
✧ Basic Geometry Options（基本几何选项）：显示几何信息，如是否可以参数化（Parameters）、参数化关键字（Parameter Key）、属性信息（Attributes）等。
✧ Advanced Geometry Options（高级几何选项）：包括显示坐标系（Coordinate System）、临时目录（Temporary Directory）等。

（4）【实体】详细设置窗口　单击分析树 Outline 中的【Geometry】|【实体参数】图标，显示【Details of “XXXX”】窗口，如图 3-35 所示。

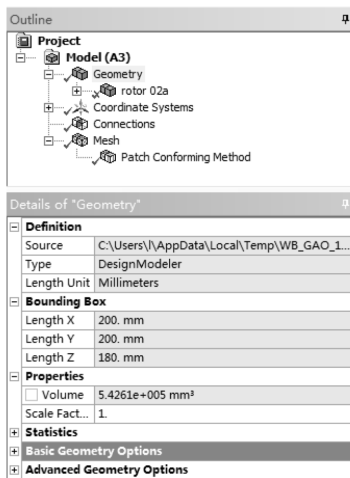


图 3-34 【Geometry】详细设置窗口

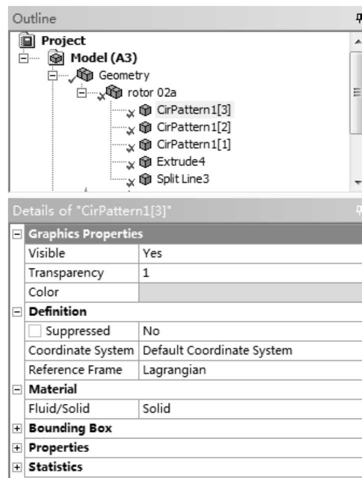


图 3-35 【实体】详细设置窗口

✧ Graphics Properties（图形属性）：包括图形显隐设置（Visible）、透明度设置（Transparency）和外观颜色设置（Color）。

✧ Definition（定义）：包括几何体是否抑制（Suppressed）、坐标系（Coordinate System）、参考框架设置（Reference Frame）（包括拉格朗日算法和欧拉虚拟算法）。

✧ Material（材料）：用于切换实体类型，可将实体由固体（Solid）切换到流体（Fluid），反之亦然。

✧ Bounding Box（边界盒）：包括 X、Y、Z 三个坐标上的长度。

✧ Properties（属性）：用于设置几何模型体积（Volume）和重心（Centroid）。

✧ Statistics（统计）：包括节点（Nodes）、单元数（Elements）和网格度量（Mesh Metric）。

（5）【Mesh】详细设置窗口　单击分析树 Outline 中的【Mesh】图标，显示【Details of “Mesh”】窗口，如图 3-36 所示。

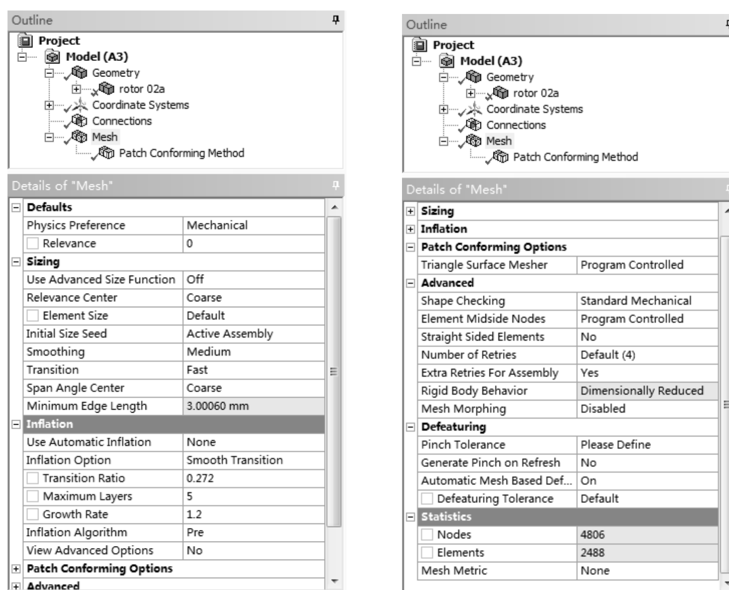


图 3-36 【Mesh】详细设置窗口

✧ Defaults（默认）：用于显示当前选择的物理场环境等信息。

✧ Sizing（尺寸）：网格尺寸设置选项。

✧ Inflation（膨胀层）：用于对几何模型进行膨胀层设置。

✧ Patch Conforming Options（网格划分算法选项）：用于选择三角形曲面网格划分方式。

✧ Advanced（高级）：用于设置网格划分的高级选项。

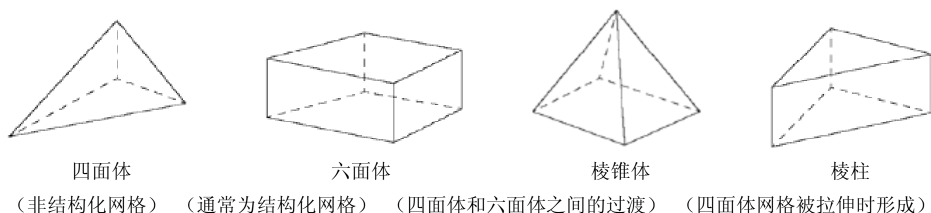
✧ Defeaturing（几何损伤设置）：用于设置网格划分的相关偏差值和选项。

✧ Statistics（统计）：用于显示节点和单元数量，同时也可选择网格评估算法（Mesh Metric）。

3.2.2 网格类型

Workbench 中 Meshing 应用程序的目标是提供通用的网格划分工具，网格划分工具可以

在任何分析类型中使用：结构动力学、显示动力学分析、电磁分析以及 CFD 分析。ANSYS Workbench 中常见的三维网格基本形状，如图 3-37 所示。



四面体（非结构化网格）　六面体（通常为结构化网格）　棱锥体（四面体和六面体之间的过渡）　棱柱（四面体网格被拉伸时形成）

图 3-37　三维网格基本形状

3.3　全局网格控制

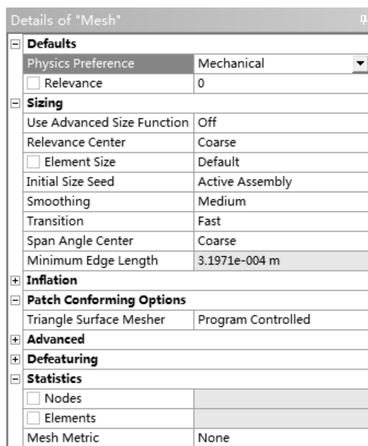
在 ANSYS Workbench 中可使用默认设置进行网格划分，但要进行高质量的网格划分，还需要用户参与到网格的详细参数设置之中去，尤其是复杂的零部件。全局网格控制相关参数在【Details of “Mesh”】详细设置窗口中。

提示：网格加密会增加计算机的计算时间和存储空间。理想的情况下，用户需要的网格密度是结果不再随网格的加密而改变的密度，即当网格细化后，解没有明显改变。

3.3.1　网格分析类型

在 ANSYS Workbench 网格划分中根据物理环境提供了不同的网格划分方法，包括“结构分析（Mechanical）”“电磁分析（Electromagnetics）”“流体分析（CFD）”和“显示动力学分析（Explicit）”。

通过设定物理优先选项（Physics Preference）设置网格分析类型参数，如图 3-38 所示。不同分析类型在默认环境下的网格特点，见表 3-1。

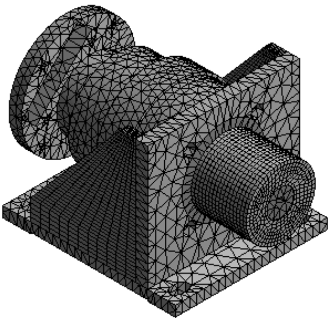


a）结构分析（默认参数）

图 3-38　ANSYS Workbench 分析类型

Details of "Mesh"

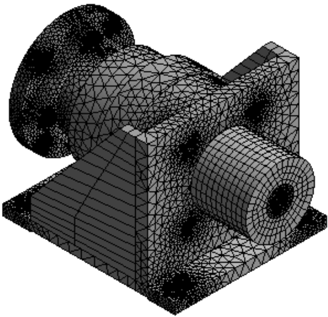
Defaults	
Physics Preference	Electromagnetics
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	3.1971e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	
Elements	
Mesh Metric	None



b）电磁分析（默认参数）

Details of "Mesh"

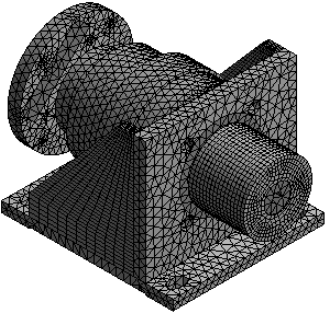
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Coarse
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (1.8701e-004 m)
Max Face Size	Default (1.8701e-002 m)
Max Size	Default (3.7402e-002 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	3.1971e-004 m
Inflation	
Assembly Meshing	
Method	None
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	



c）流体分析（默认参数）

Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	Explicit
Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	Off
Relevance Center	Medium
Element Size	Default
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Minimum Edge Length	3.1971e-004 m
Inflation	
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	
Elements	
Mesh Metric	None



d）显示分析（默认参数）

图 3-38　ANSYS Workbench 分析类型（续）

【Physics Preference】提供了 4 种网格分析类型：

✧ Mechanical：为结构和热力学有限元分析提供网格划分。
✧ Electromagnetics：为电磁场有限元分析提供网格划分。
✧ CFD：为计算流体动力学分析提供网格划分，如 CFX 和 Fluent 求解器。
✧ Explicit：为显示动力学分析提供网格划分，如 AUTODYN 和 LS-DYNA 求解器。

注意：在划分网格时，不同的分析类型有不同的网格划分要求。结构分析使用高阶单元划分为粗糙的网格；CFD 要求使用好的、平滑过渡的网格以及边界层转化；显示动力学分析时，需要均匀尺寸的网格。

表 3-1 不同分析类型在默认环境下的网格特点

物理优先选项	系统默认选项参数			
	关联中心（Relevance Center）	平滑度（Smoothing）	过渡（Transition）	实体单元默认中节点（Element Midside Nodes）
结构分析	粗糙（Coarse）	中等（Medium）	快（Fast）	程序控制（Program Controlled）
流体分析	粗糙（Coarse）	中等（Medium）	慢（Slow）	消除（Dropped）
电磁分析	中等（Medium）	中等（Medium）	快（Fast）	保留（Kept）
显示分析	中等（Medium）	高（High）	慢（Slow）	消除（Dropped）

3.3.2 相关性和关联中心——Relevance 和 Relevance Center

相关性和关联中心用于调节网格的粗糙程度。虽然关联中心（Relevance Center）在尺寸（Sizing）参数下，但由于相关性（Relevance）和关联中心（Relevance Center）通常配合使用，故在此一起加以介绍，如图 3-39 所示。

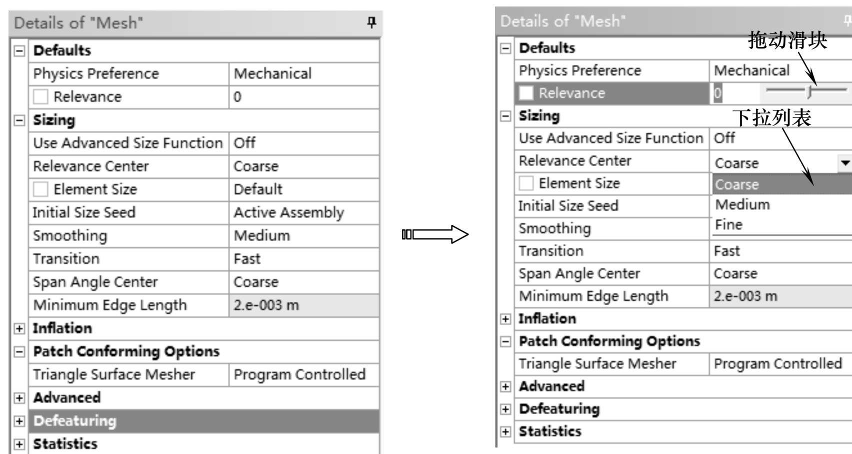


图 3-39 相关性（Relevance）和关联中心（Relevance Center）

相关性（Relevance）通过拖动滑块后直接输入−100～100 的数值来调整网格疏密程度，Relevance 数值越大，则节点和单元划分数量就越多，如图 3-40 所示。

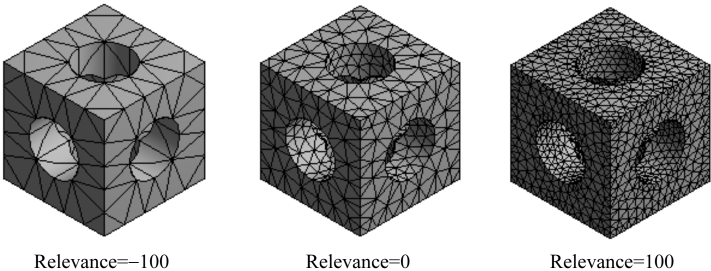


图 3-40　相关性（Relevance）

关联中心（Relevance Center）通过设置粗糙（Coarse）、中等（Medium）和细化（Fine）来设置全局网格。从 Coarse 到 Fine，几何模型的节点数目和单元数量增加，已达到细化网格的目的，如图 3-41 所示。

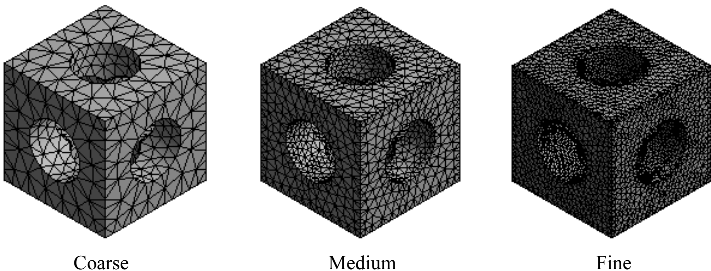


图 3-41　关联中心（Relevance Center）（Relevance=0）

3.3.3　全局单元尺寸—— Element Size

全局单元尺寸是通过在属性窗口中【Sizing】选项组中的【Element Size】选项下设置的，如图 3-42 所示。

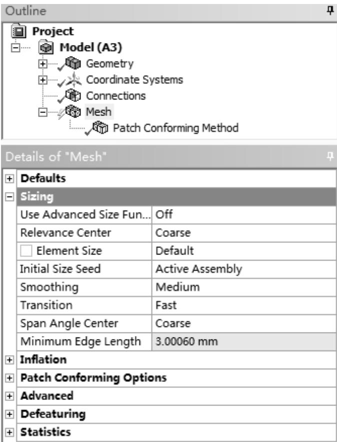


图 3-42　全局单元尺寸（Element Size）

【Element Size】选项用于设置各个模型使用的单元尺寸，该尺寸将应用到所有的边、面和体的划分中，如图 3-43 所示。当设置【Use Advanced Size Function】为 On（选用高级尺寸功能）时，该选项不可用。

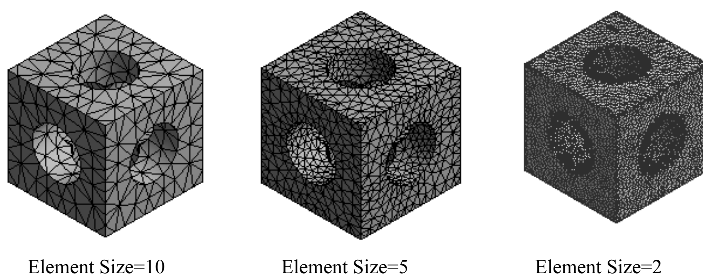


图 3-43　Element Size

注意：Element Size 的默认值是基于 Relevance 和 Initial Size Seed 而设定的。用户可采用系统默认值，也可以直接输入尺寸来提高网格质量。

3.3.4　初始尺寸种子——Initial Size Seed

初始尺寸种子（Initial Size Seed）用来控制每一个部件的初始网格种子，此时已定义的单元尺寸会被忽略，如图 3-44 所示。

在【Initial Size Seed】栏中包括 3 个选项：

- ✧ Active Assembly（激活装配体）：该选项为默认选项，初始种子放入未抑制部件，网格可以改变。
- ✧ Full Assembly（全部装配体）：选择该选项时，不考虑抑制部件的数量，初始种子放入所有装配部件。由于抑制部件的存在，网格不会改变。
- ✧ Part（部件）：选择该选项时，初始种子在网格划分时放入个别特殊部件。由于抑制部件的存在，网格不会改变。

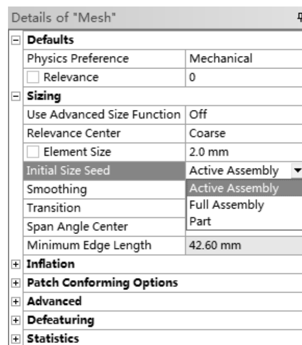


图 3-44　Initial Size Seed

3.3.5　平滑和过渡——Smoothing 和 Transition

1. Smoothing（平滑）

平滑是通过移动周围节点和单元节点位置来改进网格质量的，如图 3-45 所示。

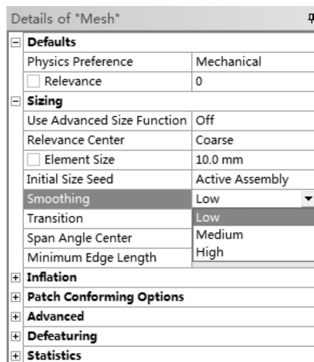


图 3-45　Smoothing

【Smoothing】下拉列表中的选项和网格划分器开始平滑的门槛尺度一起控制平滑迭代次数，如图 3-46 所示：

✧ Low：主要用于结构计算，即 Mechanical。
✧ Medium：主要用于流体动力学和电磁场计算，即 CFD 和 Electromagnetics。
✧ High：主要用于显示动力学计算，即 Explicit。

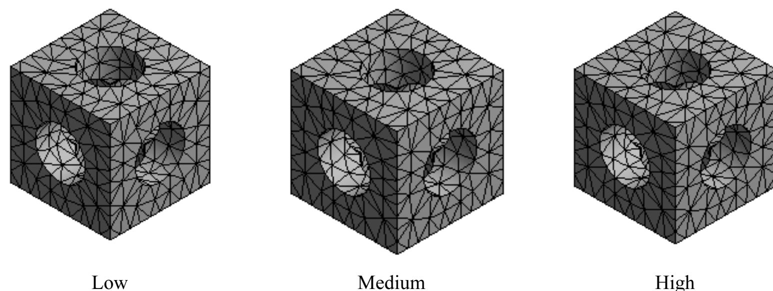


图 3-46　Smoothing 示意图

2. Transition（过渡）

过渡用于控制邻近单元的增长比，如图 3-47 所示。

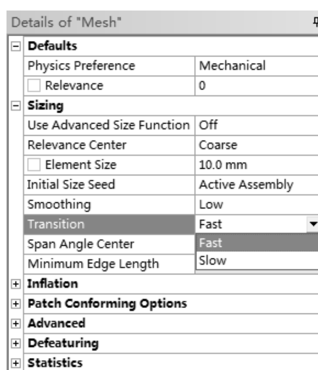


图 3-47　Transition

【Transition】下拉列表包括以下两个选项，如图 3-48 所示：

✧ Fast（快速）：在 Mechanical 和 Electromagnetics 分析类型中选择快速产生网格过渡。
✧ Slow（慢速）：在 CFD 和 Explicit 分析类型中选择慢速产生网格过渡。

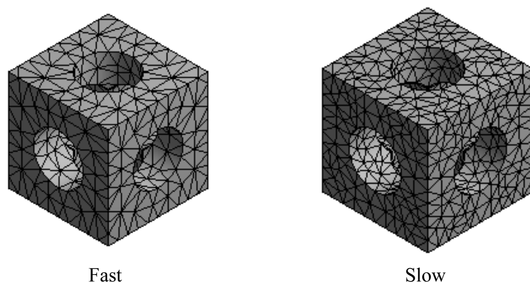


图 3-48　Transition 示意图

3.3.6　跨度中心角——Span Angle Center

跨度中心角用于设定基于边细化的曲度目标，控制网格在弯曲区域细分，直到单独单元跨越这个角，如图 3-49 所示。

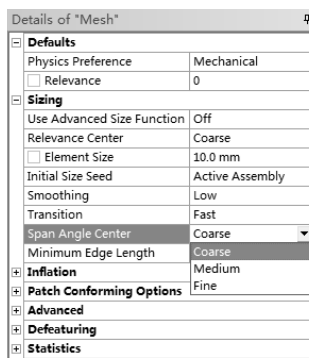


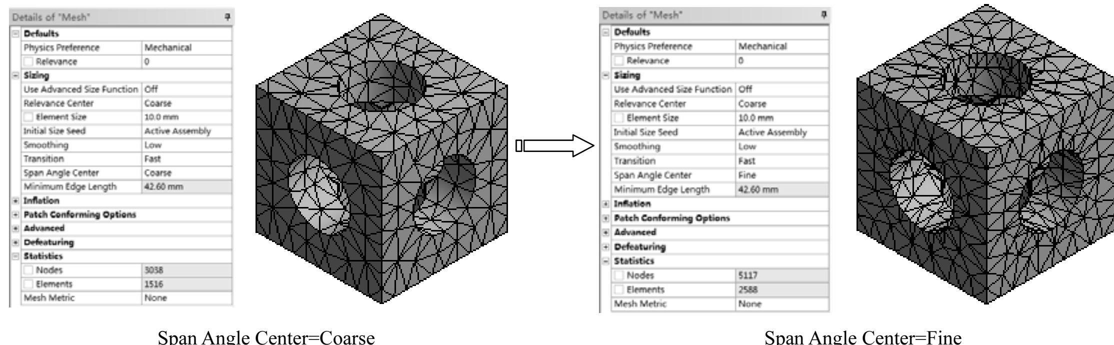
图 3-49　Span Angle Center

【Span Angle Center】下拉列表中包括以下选项，如图 3-50 所示：

✧　Coarse（粗糙）：角度为 60°～91°。

✧　Medium（中等）：角度为 24°～75°。

✧　Fine（细化）：角度为 12°～36°。



Span Angle Center=Coarse　　　　Span Angle Center=Fine

图 3-50　Span Angle Center 示意图

注意：跨度中心角（Span Angle Center）只有在 Advanced Size Function 关闭时才可使用。

3.3.7　高级尺寸功能——Use Advanced Size Function

在无高级尺寸控制时，根据已定义的单元尺寸对边划分网格；而在有高级尺寸控制时，Curvature 和 Proximity 可对网格进行细化，对缺陷和收缩控制进行调整，然后通过面和体网格划分器进行网格划分。

高级尺寸控制是通过【Sizing】选项组下的【Use Advanced Size Function】选项进行开启控制的，包括“On：Proximity and Curvature（近似和曲度）”“On：Curvature（曲度）”“On：Proximity”和“On：Fixed”，如图 3-51 所示。

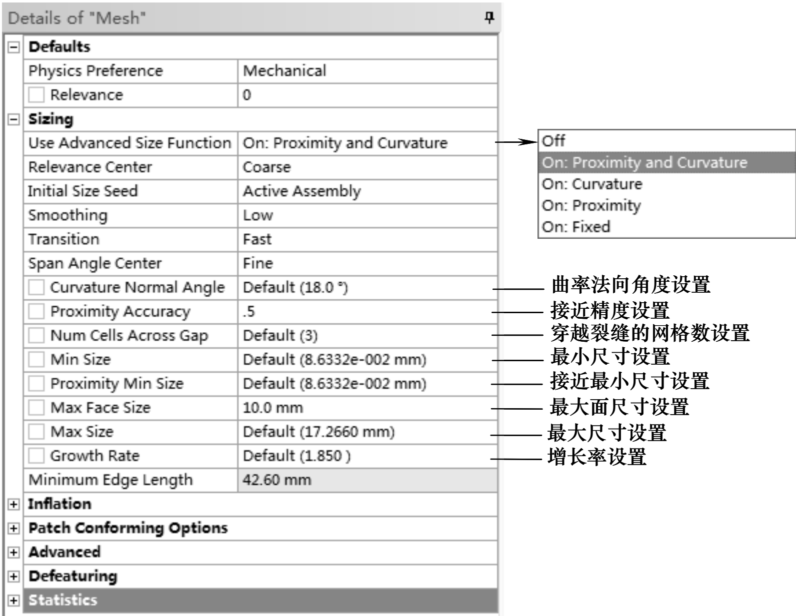


图 3-51　Use Advanced Size Function

不同选项相应的设置参数不同，各种方式下相关含义如下：

✧ Off（关闭）：采用网格划分器计算的整体单元尺寸来划分边，然后根据曲率和二维相邻细化边，最后生成相关面网格和体网格。
✧ On：Proximity and Curvature（近似和曲度）：组合曲度和近似网格划分功能。
✧ On：Curvature（曲度）：根据曲率法向角度（Curvature Normal Angle）确定边和面的单元大小。曲率法向角度为一个单元跨度所允许的最大角度，可输入 0°～180°。系统默认 18°。
✧ On：Proximity（近似）：采用控制相邻区的网格划分比率，在狭缝中放入指定的单元数，横向间隙生成更细化的表面网格。系统默认为每个间隙 3 个单元（二维和三维），默认精度为 0.5，若不允许会增大到 1。
✧ On：Fixed（固定）：采用固定的单元大小划分网格，无曲率或近似细化，根据指定的最大面单元的尺寸生成面网格，根据指定的最大单元尺寸生成体网格。

标准尺寸功能和采用高级功能对比如图 3-52 所示。

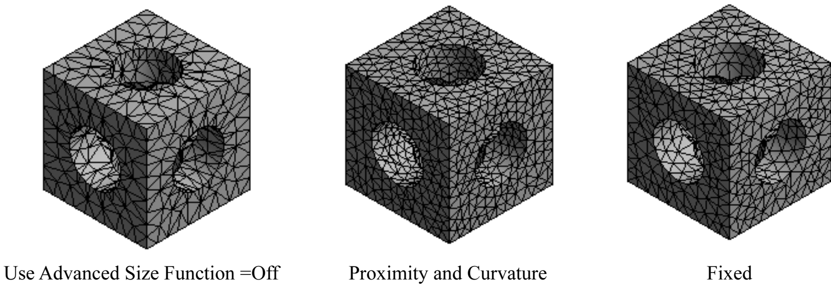


图 3-52　标准尺寸和高级功能对比

3.3.8　膨胀层——Inflation

在计算流体力学（CFD）分析中，由于一些物理参数在边界层处的梯度变化很大，为了精确地描述这些参数，通常将边界层处的网格密度较其他地方划分得密一点。膨胀层（Inflation）主要用于 CFD 分析中处理边界层处网格，如图 3-53 所示。

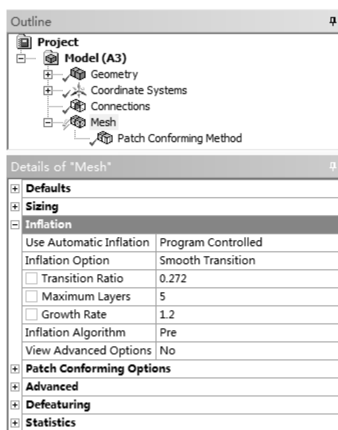


图 3-53　Inflation

【Inflation】选项组中的相关参数如下：

（1）Use Automatic Inflation（使用自动控制膨胀层）　用于设置是否启动自动控制膨胀层，包括“None（不使用自动控制膨胀层）”“Program Controlled（程序控制膨胀层）”和“All Faces in Chosen Named（以命名选择所有面）”。

（2）Inflation Option（膨胀层选项）　膨胀层选项对于二维分析和四面体网格划分的默认设置为 Smooth Transition，还包括以下选项：

✧ Smooth Transition（平滑过渡）：在邻近层之间保持平滑的体积增长率，默认情况下总厚度取决于表面网格尺寸的变化。

✧ Total Thickness（总厚度）：保持整个膨胀层的厚度恒定，需要输入网格最大厚度值（Maximum Thickness）。

✧ First Layer Thickness（第一层厚度）：保持第一层单元的厚度恒定，需要输入第一层网格的厚度值（First Layer Height）。

✧ First Aspect Ratio（第一层纵横比）：指从基础膨胀层拉伸的纵横比来控制膨胀层的厚度，默认【First Aspect Ratio】为 5，用户可修改该参数。

✧ Last Aspect Ratio（最后层纵横比）：利用第一层高度值、最高层值及纵横比控制创建膨胀层。

（3）Transition Ratio（平滑比）　用于设置平滑比率，系统默认为 0.272，用户可根据需要进行更改。

（4）Maximum Layers（最大层数）　用于设置膨胀层层数，系统默认为 5，用户可根据需要进行更改。

（5）Growth Rate（生长速率）　用于设置相邻两侧网格中内层和外层的比例，默认值为 1.2，用户可根据需要更改。

（6）Inflation Algorithm（膨胀层算法）　膨胀层算法有两种：前处理 Pre（基于 Tgrid 算法）和后处理 Post（基于 ICEM CFD 算法）。

✧ 前处理 Pre：首先生成表面网格膨胀，然后生成体膨胀，可应用扫掠和二维网格划分，但是不支持邻近面设置不同的层数。

✧ 后处理 Post：首先生成膨胀层面网格，然后生成体网格，默认选项为协调分片四面体网格，预览膨胀层仅对该算法有效。

（7）View Advanced Options（显示高级选项）　当该选项设置为 On 时，Inflation 设置会展开增加高级选项参数。

3.3.9 三角曲面划分器选项——Patch Conforming

在【Patch Conforming Options】中的【Triangle Surface Mesher】下拉列表中选择三角曲面划分器，包括【Program Controlled（程序控制）】和【Advancing Front】两个选项，如图 3-54 所示。

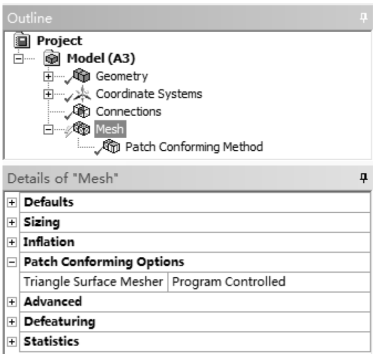


图 3-54 Patch Conforming Options

3.3.10 网格高级选项——Advanced

【Detail of “Mesh”】窗口中的【Advanced】选项用于设置网格高级选项，如图 3-55 所示。

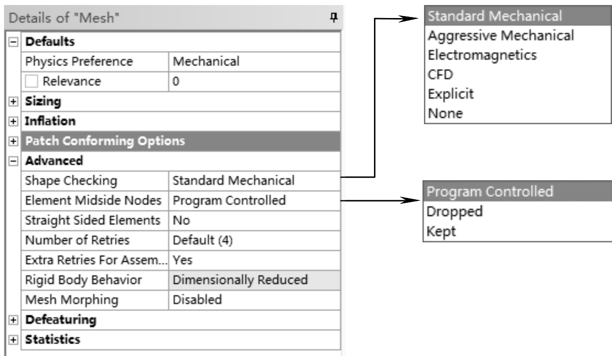


图 3-55 【Advanced】选项

【Advanced】选项中各参数的含义如下：

（1）Shape Checking（形状检查） 针对不同物理场有不同的形状检查控制。采用网格划分器计算的整体单元尺寸来划分边，然后根据曲率和 2D 相邻细化边，最后生成相关面网格和体网格。

- ✧ Standard Mechanical（标准结构计算网格形状）：基于结构计算的网格形状控制，利用 Meshing 程序控制。
- ✧ Aggressive Mechanical（改进的结构计算网格形状）：基于改进的结构计算的网格控制，利用 Meshing 程序控制。
- ✧ Electromagnetics（电磁场计算网格形状）：基于电磁计算的网格形状控制，利用 Emag

程序控制。

✧ CFD（流体动力学计算网格形状）：基于流体动力学计算的网格形状控制，利用 Fluent 或 CFX 程序控制。

✧ Explicit（显示动力学计算网格形状）：基于显示动力学计算的网格形状控制，利用 AUTODYN 或 LS DYNA 程序控制。

（2）Element Midside Nodes（单元中间节点） 单元中间节点默认为 Program Controlled（程序控制），除此之外还包括以下选项：

✧ Dropped（去掉中间节点）：选择该方式，在网格划分时将去除掉单元的中间节点。

✧ Kept（保留中间节点）：选择该方式，在网格划分时将保留单元的中间节点。

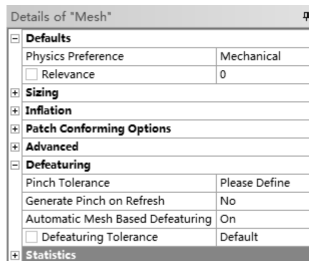
（3）Straight Sided Elements（直边单元） 当模型存在实体或存在由 DesignModeler 得到的场体时可用，电磁场分析一般设置为 Yes。

（4）Number of Retries（重试次数） 用于设置网格剖分时失败的重新划分次数。

（5）Mesh Morphing（网格变形） 用于设置是否允许网格变形，包括 Disabled（不允许）和 Enable（允许）两种。

3.3.11 网格损伤设置——Defeaturing

【Detail of“Mesh”】窗口中的【Defeaturing】选项用于设置网格损伤选项，如图 3-56 所示。



Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Advanced	
Defeaturing	
Pinch Tolerance	Please Define
Generate Pinch on Refresh	No
Automatic Mesh Based Defeaturing	On
Defeaturing Tolerance	Default
Statistics	

图 3-56 【Defeaturing】选项

【Defeaturing】选项中各参数的含义如下：

✧ Pinch Tolerance（收缩容差）：网格生成时会产生缺陷，收缩容差定义收缩控制，用于自定义整个收缩容差控制值，收缩只能对顶点和边起作用，对于面和体不能收缩。

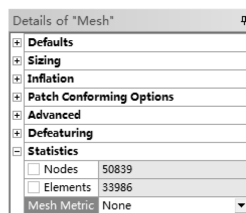
✧ Generate Pinch on Refresh（重新刷新时产生收缩）：默认是 Yes。

✧ Automatic Mesh Based Defeaturing（基于损伤位置自动划分网格）：程序默认状态为 ON，即针对损伤处网格，程序自动控制处理合理化网格生成。

✧ Defeaturing Tolerance（损伤容差）：程序默认为默认状态，可以根据工程需要自己设定损伤容差值来调整损伤网格，以满足工程需求。

3.3.12 网格评估统计——Statistics

【Detail of“Mesh”】窗口中的【Statistics】选项用于设置网格高级选项，如图 3-57 所示。



Details of "Mesh"	
Defaults	
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	50839
Elements	33986
Mesh Metric	None

图 3-57 【Statistics】选项

【Statistics】选项中各参数的含义如下：

1. Nodes（节点数）

当几何模型的网格划分完成后，显示节点数量。

2. Elements（单元数）

当几何模型的网格划分完成后，显示单元数量。

3. Mesh Metric（网格质量）

通过网格检查工具检查划分的网格质量的好坏，包括以下选项：

（1）Element Quality（单元质量） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Element Quality】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-58 所示。图中横坐标由 0 到 1，网格质量由坏到好，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

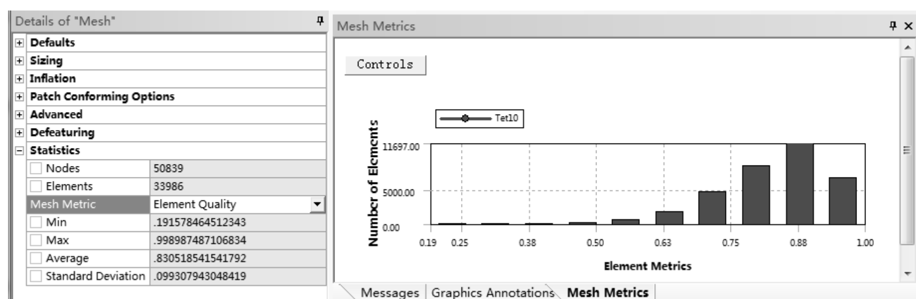


图 3-58 Element Quality（单元质量）图表

除了线单元和点单元以外，基于给定单元的体积与边长的比值计算模型中的单元质量因子，该选项提供了一个综合的单元质量度量标准，范围为 0～1，1 代表完美的正方体或正方形，0 代表单元体积为 0 或负值。

（2）Aspect Ratio（网格宽高比） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Aspect Ratio】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-59 所示。图中横坐标显示网格宽高比值，网格质量由好到坏，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

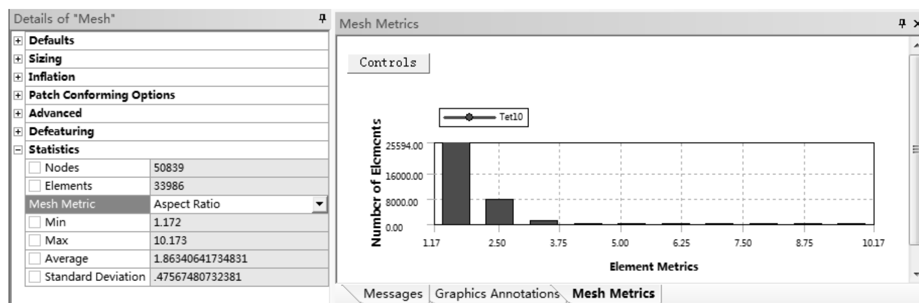


图 3-59 Aspect Ratio（网格宽高比）图表

网格宽高比对比单元的三角形或四边形顶点计算长度比，理想单元的纵横比为 1，对于小边界、弯曲形体、细薄特性和尖角等，生成的网格中会有一些边远远长于另外一些边，如图 3-60 所示。

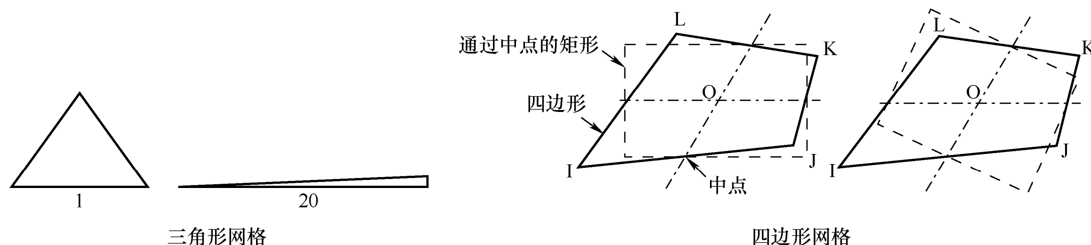


图 3-60 网格宽高比

（3）Jacobian Ratio（雅克比比率） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Jacobian Ratio】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-61 所示。图中横坐标显示高雅克比比率，网格质量由坏到好，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

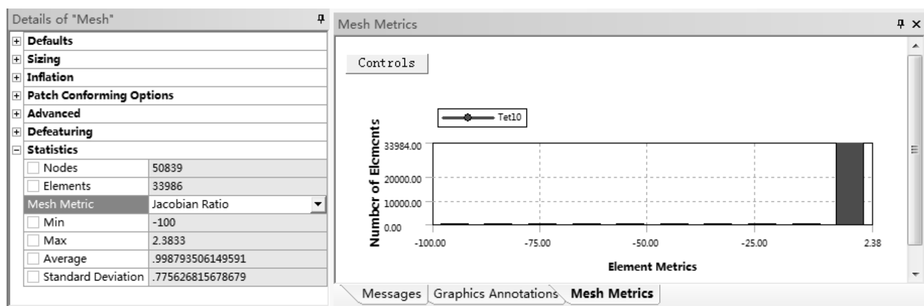


图 3-61 Jacobian Ratio（雅克比比率）图表

除了线性的三角形及四面体单元，或者完全对中的中间节点单元以外，雅克比比率计算所有其他单元，高雅克比比率代表单元空间与真实空间的映射极度失真。此外，一个极端扭曲单元的雅克比是负值（−100），此时单元不能接受，计算终止。

✧ 三角形单元的雅克比比率：如果三角形的每个中间点都在三角形边的中点上，那么这个三角形的雅克比比率为 1，如图 3-62 所示。

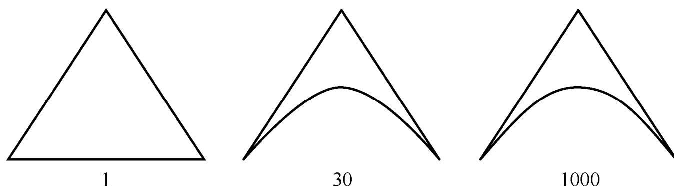


图 3-62 三角形网格的雅克比比率

✧ 四边形单元的雅克比比率：任何一个矩形单元或平行四边形单元，无论是否含有中间节点，其雅克比比率都为 1；如果垂直一条边的方向向内或者向外移动这一条边上的中间节点，可增加雅克比比率，如图 3-63 所示。

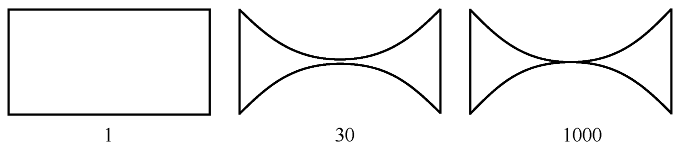


图 3-63 四边形网格的雅克比比率

✧ 六面体单元的雅克比比率：所有边都相互平行，在任何边上的中间节点都位于两个角点的中间位置，雅克比比率为 1，如图 3-64 所示。

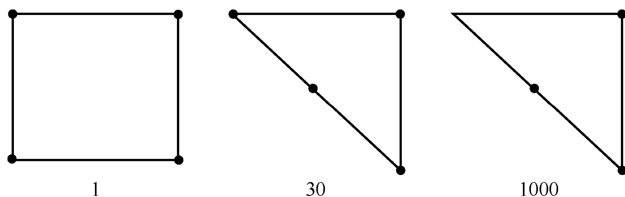


图 3-64 六面体网格的雅克比比率

（4）Warping Factor（翘曲因子） 对于某些四边形壳单元及六面体、棱柱、楔形体的四边形面计算，高翘曲因子暗示程序无法很好地处理单元算法或提示网格质量有缺陷，如图 3-65 所示。

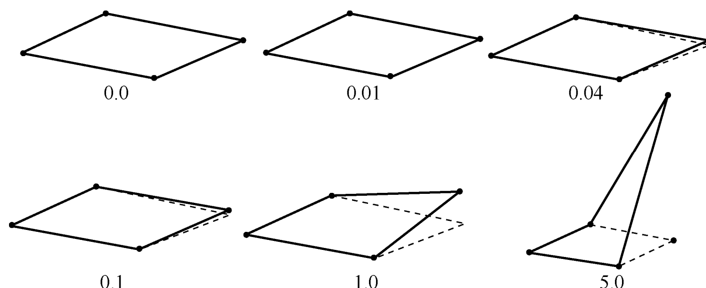


图 3-65 翘曲因子

（5）Parallel Deviation（平行偏差） 针对边矢量的点积，通过点积中的余弦值求出最大的夹角，如图 3-66 所示。平行偏差为 0° 最好，此时两对边平行，中间无节点的四边形的警告限值为 70° ，如果超过 150° ，则给出错误信息。

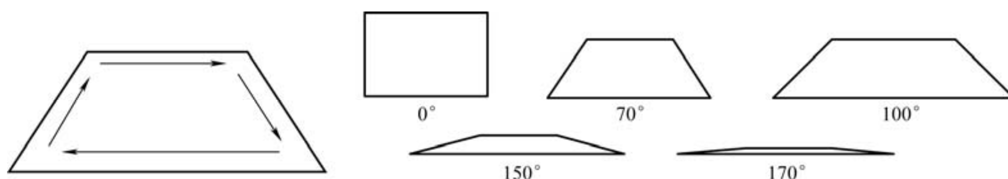


图 3-66 平行偏差

（6）Maximum Corner Angle（最大壁角角度） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Maximum Corner Angle】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-67 所示。图中横坐标显示角度值，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

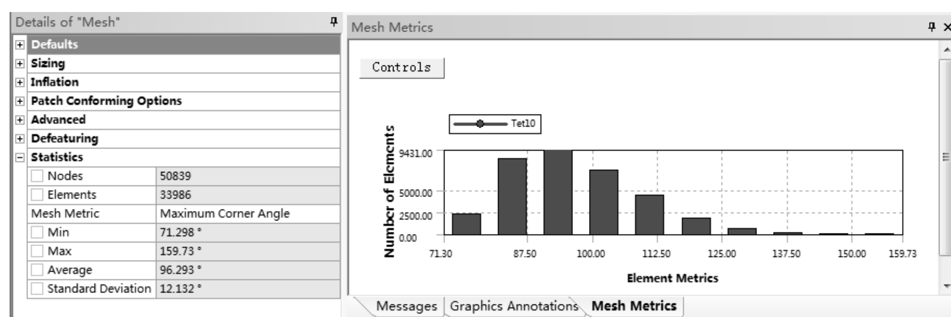


图 3-67 Maximum Corner Angle（最大壁角角度）图表

除了 Emag 或 FLOTRAN 单元，其他所有单元都计算最大壁角，如无中间节点的四边形单元该项警告限值为 155° ，而其他错误限值为 179.9° ，理想三角形最大壁角为 60° ，四边形最大壁角为 90° ，如图 3-68 所示。

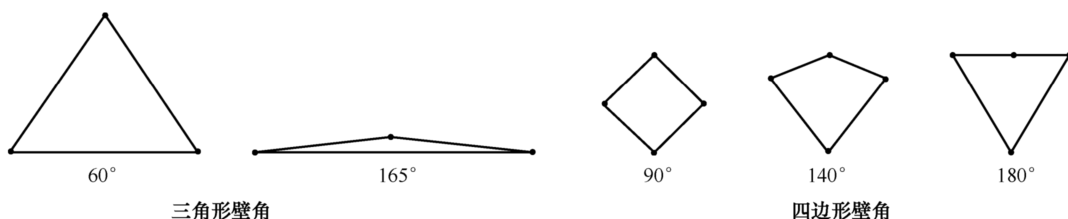


图 3-68 最大壁角

（7）Skewness（倾斜度） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Skewness】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-69 所示。图中横坐标显示倾斜度，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

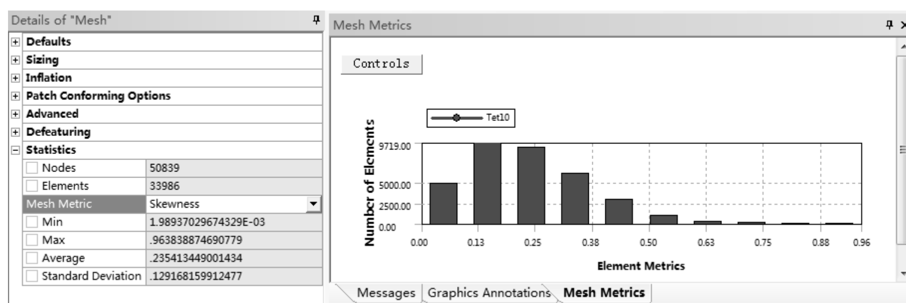


图 3-69 Skewness（倾斜度）图表

倾斜度是基本的单元质量检测标准之一。倾斜度确定如何接近理想形状（等边或等角），最优值为 0，最差值为 1，见表 3-2。

表 3-2 倾斜度质量评估

单元质量	等边	优秀	好	中等可接受	次等	坏（狭长）	退化
倾斜度	0	>0～0.25	0.25～0.5	0.5～0.75	0.75～0.9	0.9～<1	1

（8）Orthogonal Quality（正交质量） 在【Mesh Metric】下拉列表中选择【Orthogonal Quality】，在信息栏中出现【Mesh Metrics】窗口，显示网格质量划分图表，如图 3-70 所示。图中横坐标显示正交质量值，纵坐标显示的是网格数量，网格数量与矩形条的高度成正比。

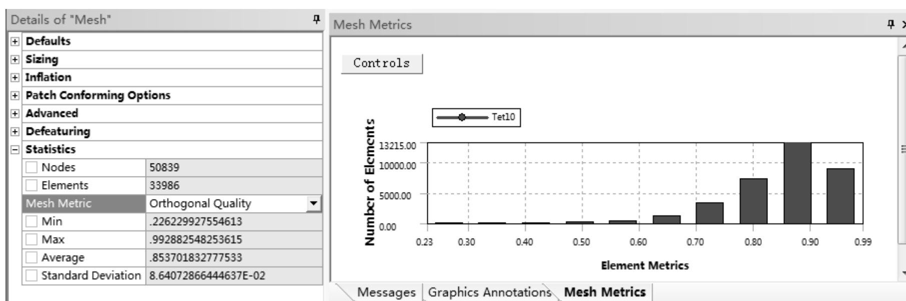


图 3-70 Orthogonal Quality（正交质量）图表

正交质量对单元采用面法向矢量、从单元中心指向每个相邻单元中心的矢量，以及从单元中心指向每个面的矢量计算。变化范围为 0～1，最优值为 1，最差值为 0。

Fluent 和 CFX 对网格质量的要求不同，这是由于两种模式的求解结构不同，Fluent 使用单元中心格式，流体流动变量位于计算单元的中心，网格单元和计算单元是一致的；而 CFX 使用节点中心格式，流体流动变量位于单元节点，求解单元或控制体积是双重网格单元，这意味着网格单元的节点是求解单元的中心。

对 Fluent 网格质量的建议：不推荐采用低正交质量或高倾斜度，应保证最小正交质量大于 0.1 或最大倾斜度小于 0.95，这些值取决于物理场和单元所在位置。如果网格包含不好的单元，Fluent 会报告负的单元体积，网格质量评估见表 3-3。

表 3-3　Fluent 网格质量评估

单元质量	优　秀	很　好	较　好	可接受	坏	无法接受
倾斜度	>0～0.25	0.25～0.5	0.5～0.8	0.8～0.94	0.94～<0.97	0.98～1
正交质量评估	0.95～1	0.7～0.95	0.2～0.69	0.1～0.2	0.001～0.1	0～0.001

对 CFX 网格质量的建议：CFX 求解器在开始运行时计算网格正交角度、纵横比和膨胀因子这 3 个重要的网格质量度量指标，每次网格变形后进行更新。网格正交角度应大于 20°，纵横比测量一个拉伸体如何被拉伸，应小于 100，与 CFX Post 的边长比相似。膨胀因子测量节点位置与对应控制中心的不匹配度，网格膨胀因子约为节点周围最大单元体积和最小单元体积之比，应小于 20，基本上等同于 CFX Post 的单元体积比。

3.4　局部网格控制

根据所使用的网格划分方法，可用到的局部网格控制尺寸包括“局部尺寸（Sizing）”“接触尺寸（Contact Sizing）”“细化（Refinement）”“映射面（Mapped Face Meshing）”“匹配控制（Match Control）”“收缩控制（Pinch）”和“膨胀层（Inflation）”等。

3.4.1　启动局部网格控制命令

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】菜单下的相关命令，或者单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control】下的相关命令按钮，可启动局部网格控制命令，如图 3-71 和图 3-72 所示。

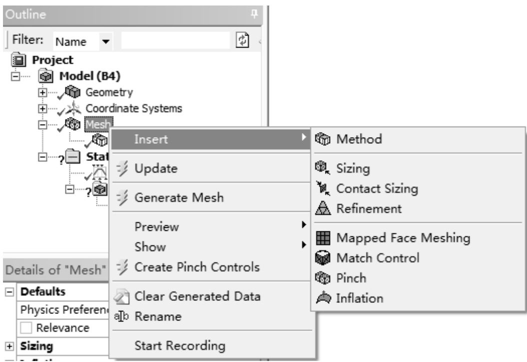


图 3-71　【Mesh】节点的快捷菜单



图 3-72　【Mesh】工具栏

3.4.2 局部尺寸——Sizing

要实现局部尺寸（Sizing）控制，在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【size（尺寸）】命令，选择要进行划分的线、面或体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在局部尺寸属性窗格中设置相关参数即可，如图 3-73 所示。

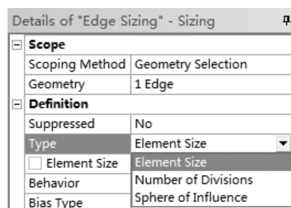


图 3-73 局部尺寸参数

在【Definition】选项组中的【Type】下拉列表中提供了 3 种局部尺寸类型：

✧ Element Size：用于定义体、面、线等的平均单元长度。
✧ Number of Divisions：用于定义边的单元分段数。
✧ Sphere of Influence：用于定义球体内单元给定的平均单元尺寸。

局部尺寸类型取决于所选择的对象，选择的对象不同，属性窗格选项不同，见表 3-4。

表 3-4 不同选择对象时的可用选项

选择对象	单元尺寸（Element Size）	分段数量（Number of Divisions）	影响球（Sphere of Influence）
体	√		√
面	√		√
边	√	√	√
顶点			√

1．选择面

当选择面时，可设置单元尺寸（Element Size）和影响球（Sphere of Influence），如图 3-74 和图 3-75 所示。

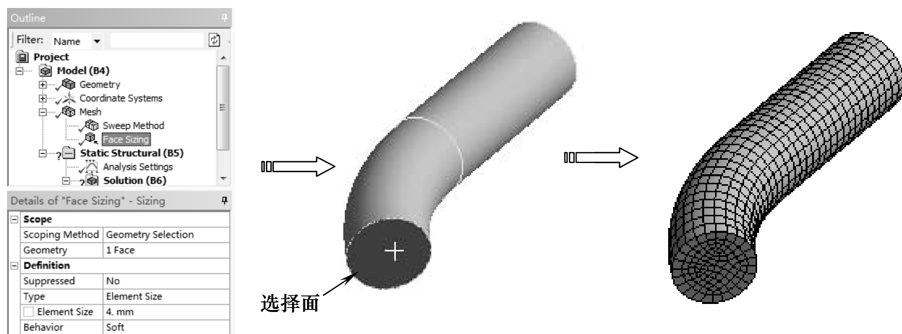


图 3-74 设置单元尺寸

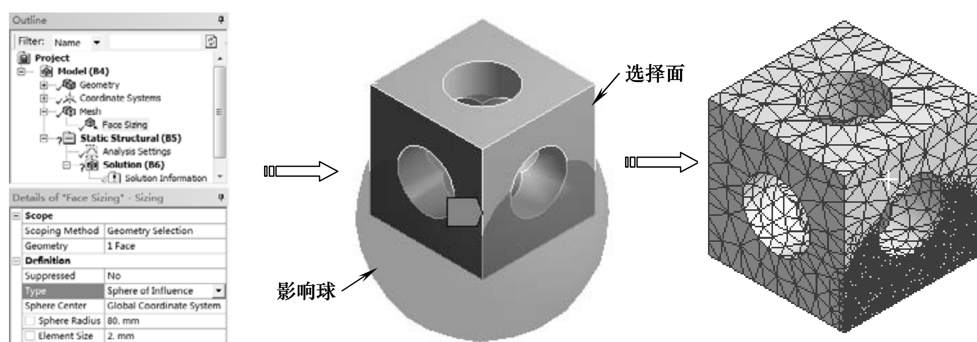


图 3-75　设置影响球

2．选择边

当选择边时，可设置单元尺寸（Element Size）、分段数量（Number of Divisions）和影响球（Sphere of Influence），如图 3-76 所示。

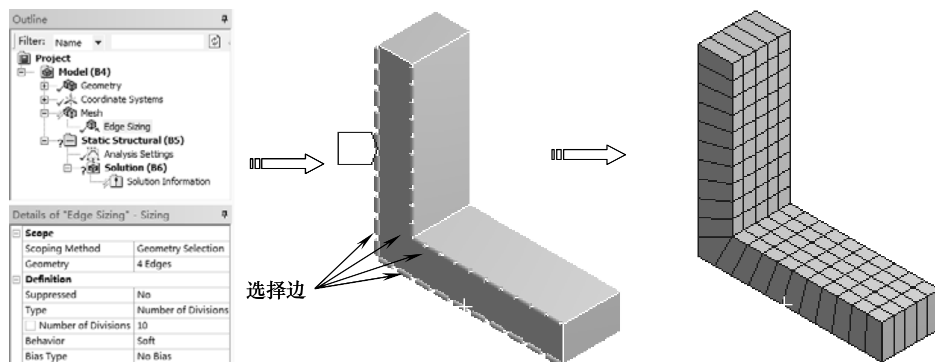


图 3-76　设置分段数量

3．选择顶点

选择顶点时，可以顶点为中心建立影响球，位于球内的单元具有给定的平均尺寸，如图 3-77 所示。

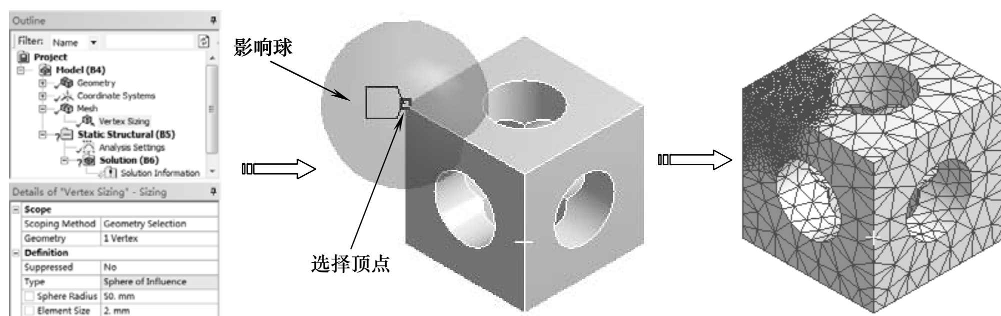


图 3-77　选择顶点

4．选择体

选择体时，可设置单元尺寸（Element Size）和影响球（Sphere of Influence），如图 3-78

所示。

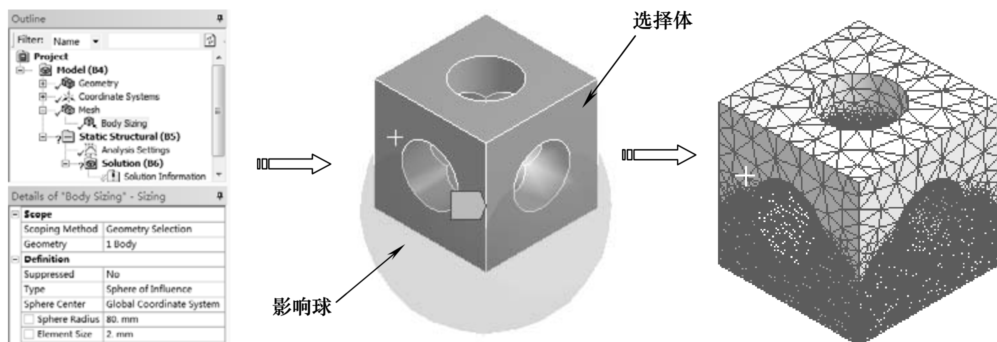


图 3-78　选择体

3.4.3　接触尺寸——Contact Sizing

接触尺寸（Contact Sizing）用于在部件间接触面上产生近似尺寸单元（网格的尺寸近似但不共形）。要实现接触尺寸，可在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Contact Sizing（接触尺寸）】命令，在【Contact Region】下拉列表框中选择接触区域，在接触属性窗格中可采用【Element Size】和【Relevance】两种方式来定义接触单元尺寸，如图 3-79 所示。

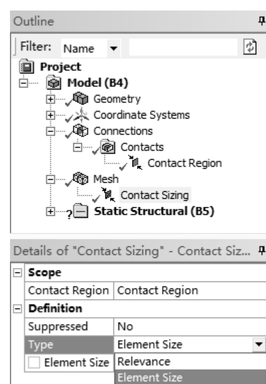


图 3-79　接触尺寸参数

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Contact Sizing（接触尺寸）】命令，在【Contact Region】下拉列表框中选择接触区域，在接触属性窗格中设置【Element Size】为 2mm，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-80 所示。

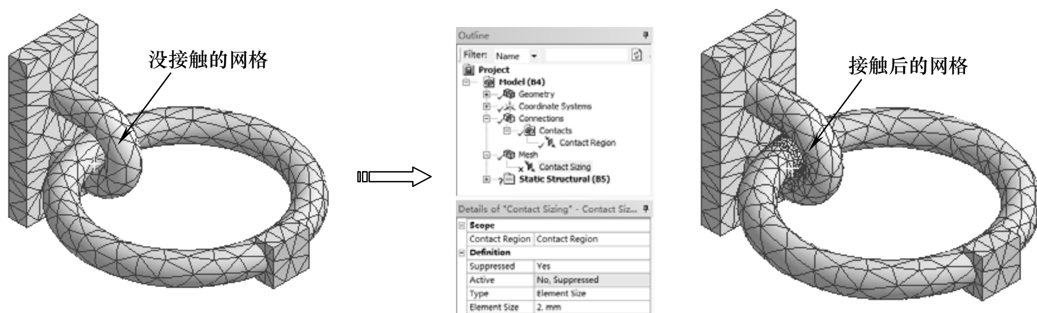


图 3-80　接触后的网格

3.4.4　细化——Refinement

细化就是对现有网格局部进行加密处理。要实现单元细化（Refinement），可在【Outline

（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Refinement（细化）】命令，选择要进行划分的线、面或顶点，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，然后在细化属性窗格中设置相关参数，如图 3-81 所示。

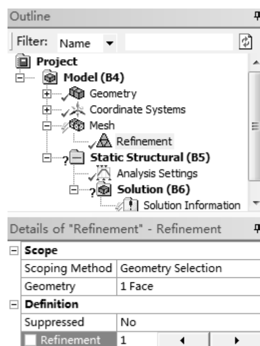


图 3-81　细化参数

细化水平（Refinement）可设置 1～3 的任意数值。当细化水平为 1 时，将初始网格单元边一分为二。

注意：由于不能使用膨胀，所以对 CFD 进行网格划分时不推荐使用细化功能。

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Refinement（细化）】命令，选择如图 3-82 所示的面或顶点，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在细化属性窗格中设置【Refinement】为 2，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成细化网格，如图 3-82 所示。

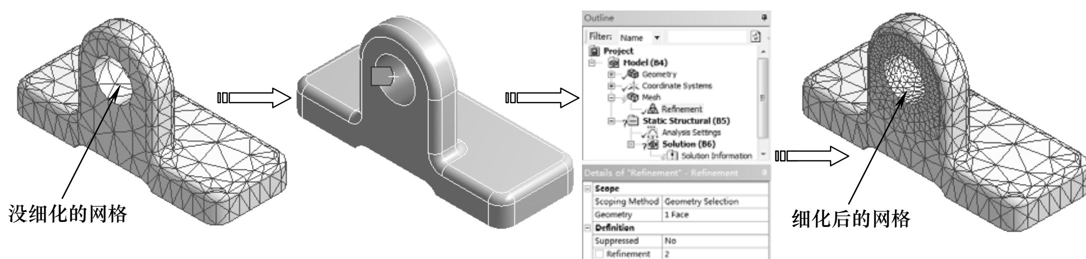


图 3-82　细化网格

3.4.5　映射面划分——Mapped Face Meshing

映射面划分（Mapped Face Meshing）可在面上产生机构网格，以便得到更均匀的网格模式。

要实现映射面划分，可在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Mapped Face Meshing（映射面划分）】命令，选择要进行划分的面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，然后在映射面划分属性窗格中设置相关参数，如图 3-83 所示。

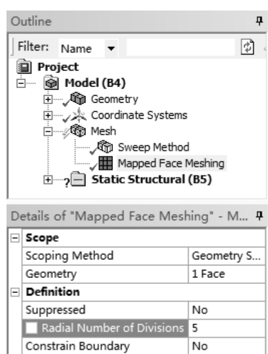


图 3-83　映射面划分参数

注意：进行映射面划分时，如果选择的映射面划分的面是由两个回线定义的，就要激活径向分割数，扫掠时指定穿越环形区域的分割数。

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Mapped Face Meshing（映射面划分）】命令，选择要进行划分的面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在映射面属性窗格中设置【Radial Number of Divisions】为 5，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-84 所示。

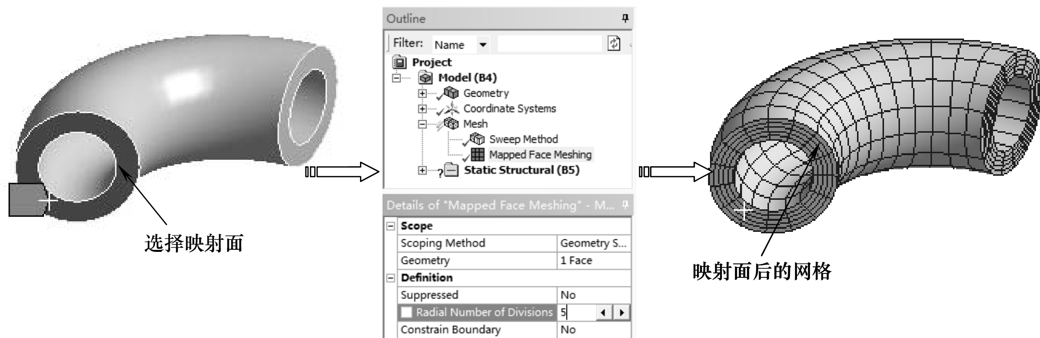


图 3-84　映射面划分的网格

3.4.6　匹配控制——Match Control

匹配控制（Match Control）用于在三维周期对称面或二维周期对称边上划分一致的网格，尤其适用于旋转机械的旋转对称分析，因为旋转对称所使用的约束方程其连接的截面上节点的位置除偏移外一致。

要实现匹配控制，可在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Match Control（匹配控制）】命令，选择要进行匹配的面，单击【Scope】项中的【Apply】按钮，然后在详细设置窗口中设置相关参数，如图 3-85 所示。

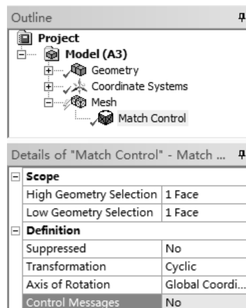


图 3-85　匹配控制参数

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Match Control（匹配控制）】命令，选择要进行匹配的面，单击【Scope】项中的【Apply】按钮，在详细设置窗口中设置【Transformation】为 Cyclic，【Axis of Rotation】为 Global Coordinate System，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-86 所示。

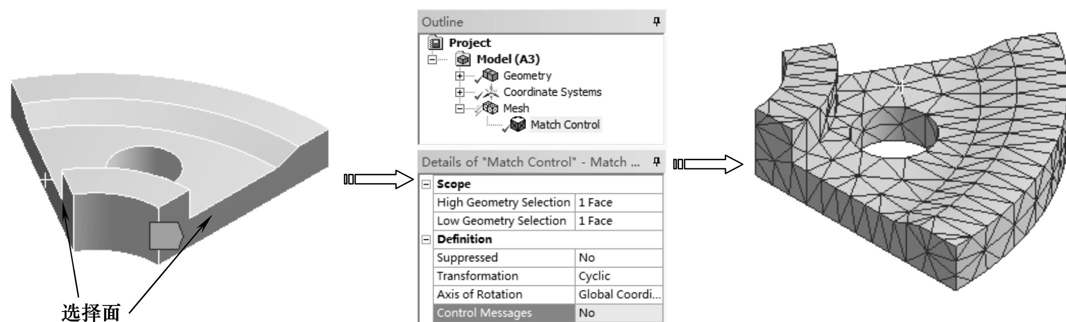


图 3-86　匹配控制划分的网格

3.4.7　收缩控制——Pinch

收缩控制（Pinch）可在网格上移除小特征（边或狭长区域），收缩控制只对顶点和边起作用，面和体不能收缩。

要实现收缩控制，可在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Pinch（收缩控制）】命令，选择要进行收缩的顶点或边，然后在详细设置窗口中设置相关参数，如图 3-87 所示。

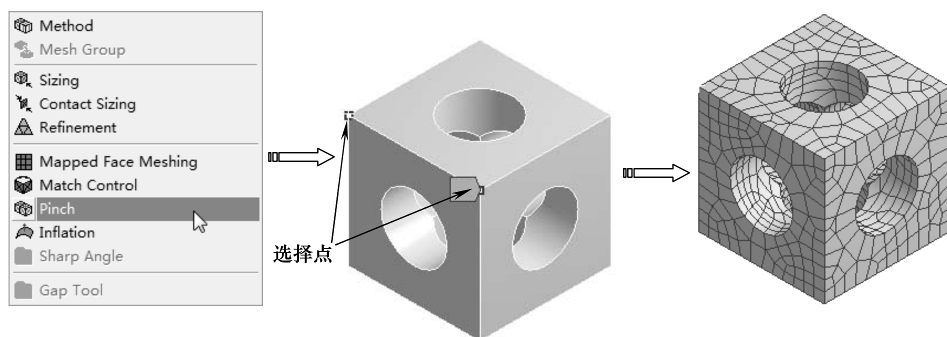


图 3-87　收缩控制

3.4.8　膨胀——Inflation

在计算流体力学（CFD）分析中，由于一些物理参数在边界层处的梯度变化很大，为了精确地描述这些参数，通常将边界层处的网格密度较其他地方划分得密一点。膨胀（Inflation）主要用于 CFD 分析中处理边界层处的网格，其中包括纯六面体和四面体网格。

要实现膨胀，可在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Inflation（膨胀）】命令，然后在膨胀属性窗格中设置相关

参数，如图 3-88 所示。

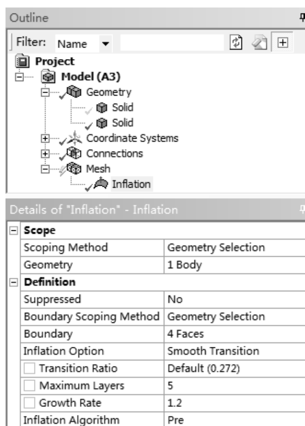


图 3-88　膨胀参数

【Details of“Inflation”】属性窗口中的相关参数的含义如下：

（1）Scope　用于选择膨胀设置的实体。

（2）Boundary　用于选择设置膨胀层的实体表面。

（3）Inflation Option　膨胀层选项对于二维分析和四面体网格划分的默认设置为 Smooth Transition，还包括以下选项：

✧ Smooth Transition（平滑过渡）：在邻近层之间保持平滑的体积增长率，默认情况下总厚度取决于表面网格尺寸的变化。

✧ Total Thickness（总厚度）：保持整个膨胀层的厚度恒定，需要输入网格最大厚度值（Maximum Thickness）。

✧ First Layer Thickness（第一层厚度）：保持第一层单元的厚度恒定，需要输入第一层网格的厚度值（First Layer Height）。

✧ First Aspect Ratio（第一层纵横比）：指从基础膨胀层拉伸的纵横比来控制膨胀层的厚度，默认【First Aspect Ratio】为 5，用户可修改该参数。

✧ Last Aspect Ratio（最后层纵横比）：利用第一层高度值、最高层值及纵横比控制创建膨胀层。

（4）Transition Ratio（平滑比）　是指平滑比率，系统默认为 0.272，用户可根据需要进行更改。

（5）Maximum Layers（最大层数）　用于设置膨胀层层数，系统默认为 5，用户可根据需要进行更改。

（6）Growth Rate（生长速率）　用于设置相邻两侧网格中内层和外层的比例，默认值为 1.2，用户可根据需要更改。

（7）Inflation Algorithm（膨胀层算法）　膨胀层算法有两种：前处理 Pre（基于 Tgrid 算法）和后处理 Post（基于 ICEM CFD 算法）。

✧ 前处理 Pre：首先生成表面网格膨胀，然后生成体膨胀，可应用扫掠和二维网格划分，但是不支持邻近面设置不同的层数。

✧ 后处理 Post：首先生成膨胀层面网格，然后生成体网格，默认选项为协调分片四面体网格，预览膨胀层仅对该算法有效。

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Inflation（膨胀）】命令，选择如图 3-89 所示要膨胀的实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，选择实体圆柱外表面，然后单击【Boundary】项中的【Apply】按钮，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-89 所示。

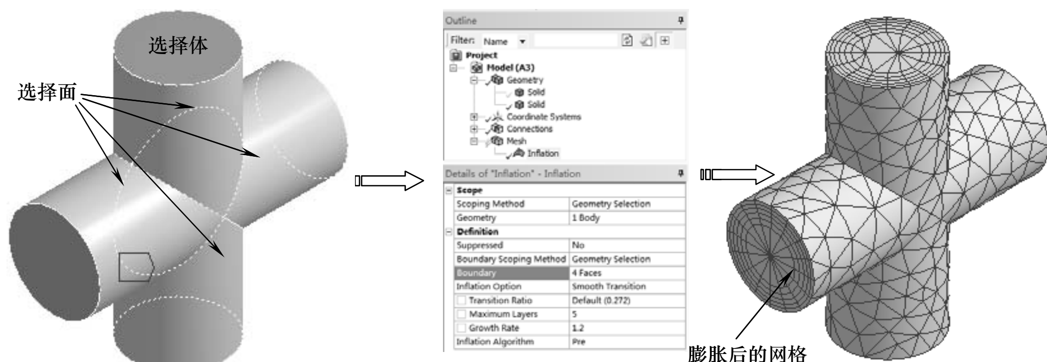


图 3-89　膨胀网格

3.5　网格划分方法

在 ANSYS Workbench 中提供了多种网格划分方法，包括自动划分方法、四面体方法、六面体方法、扫掠方法和多区域方法。下面分别加以介绍。

3.5.1　网格划分方法简介

选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Method】命令，或者选择【Mesh】工具栏上的【Mesh Control】|【Method】命令，可启动网格划分命令，如图 3-90 所示。

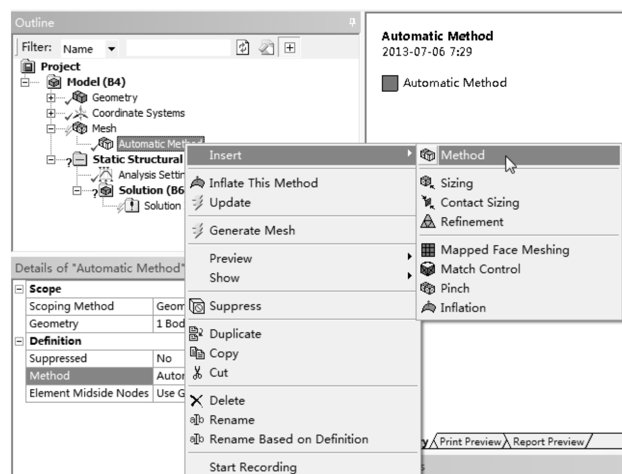


图 3-90　启动网格划分命令

启动网格划分命令后，在【Mesh】节点下增加【Automatic Method】节点（程序默认的是自动划分方法），在属性窗口【Definition】选项组下的【Method】下拉列表中选择合适的网格划分方法，如图 3-91 所示。

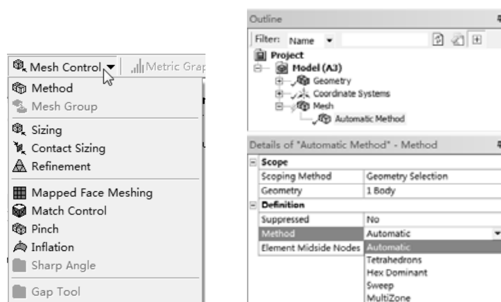


图 3-91　选择网格划分方法

（1）自动划分方法（Automatic）　自动设置四面体或扫掠网格划分，如果体是可扫掠的，则体将被扫掠划分网格，否则将使用【Tetrahedrons】下的 Patch Conforming 网格划分方法划分网格。同一部件的体具有一致的网格单元。

（2）四面体方法（Tetrahedrons）　四面体划分方法包括 Patch Conforming 划分法（ANSYS Workbench 自带）和 Patch Independent 划分法（依靠 ICEM CFD Tetra Algorithm 软件包实现）。

（3）六面体方法（Hex Dominant）　首先生成四边形主导的面网格，然后得到六面体，最后根据需要填充棱锥和四面体单元。该方法适用于不可扫掠的体或内部容积大的体，而对体积和表面积比较小的薄复杂体、CFD 无边界层的识别无用。

（4）扫掠方法（Sweep）　通过扫掠方法进行网格划分，网格多是六面体单元，也可能是楔形体单元。

（5）多区域方法（MultiZone）　多区域划分网格是一种自动几何分解方法，使用该方法时，元件将被切成多个体来得到六面体网格。

3.5.2　自动划分方法——Automatic

自动划分方法（Automatic）是最简单的网格划分方法。自动划分方法实际上就是在四面体和扫掠型划分之间进行自动切换，这取决于被划分的几何体能否被扫掠。也就是说，如果几何体不规则（即不能被扫掠），程序就采用协调分片算法自动生成四面体；如果几何体规则（即能被扫掠），则采用扫掠方法产生六面体网格，如图 3-92 所示。

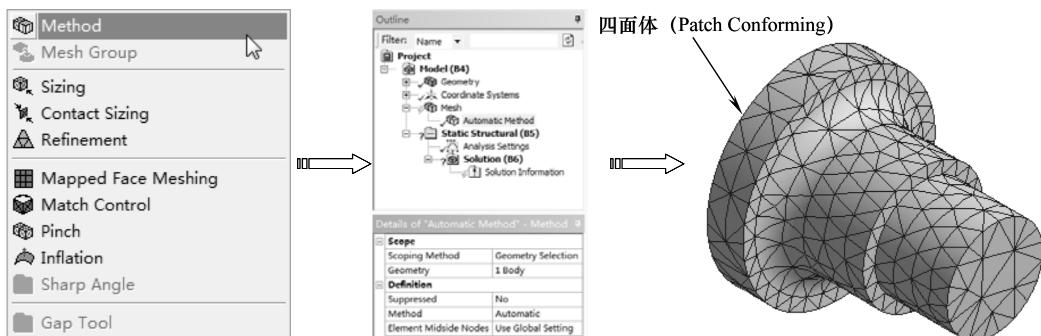


图 3-92　自动网格划分

3.5.3 四面体方法——Tetrahedrons

四面体（Tetrahedrons）网格划分方法是基本的划分方法。四面体网格是非结构网格，优点是四面体网格可施加于任何几何体，可快速、自动生成；在关键区域容易使用曲度和近似尺寸功能自动细化网格；可使用膨胀细化实体边界附近的网格（即边界层识别），边界层有助于面法向网格细化。缺点是，在近似网格密度情况下，单元和节点数高于六面体网格；网格一般不可能在一个方向排列；由于几何和单元性能的非均质性，故不适合于薄实体或环形体；使用等向细化时网格数量急剧上升。

四面体（Tetrahedrons）网格划分方法在 ANSYS Workbench 中有两种：Patch Conforming 和 Patch Independent。

（1）Patch Conforming　Patch Conforming 是 ANSYS Workbench 自带的功能，它首先由默认的考虑几何所有面和边的 Delaunay 或 Advancing Front 表面网格划分器生成表面网格（注意，生成体网格的一些内在缺陷在最小尺寸限度之下），然后基于 TGRID Tetra 算法由表面网格生成体网格，如图 3-93 所示。

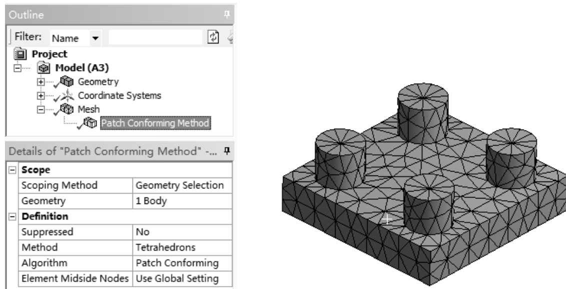


图 3-93　Patch Conforming 方法

（2）Patch Independent　Patch Independent 依靠 ICEM CFD 软件包实现，它生成体网格并映射到表面产生表面网格。如果没有载荷、边界条件或其他作用，面和它们的边界（边和顶点）不必考虑。这种方法更加容许质量差的 CAD 几何，如图 3-94 所示。

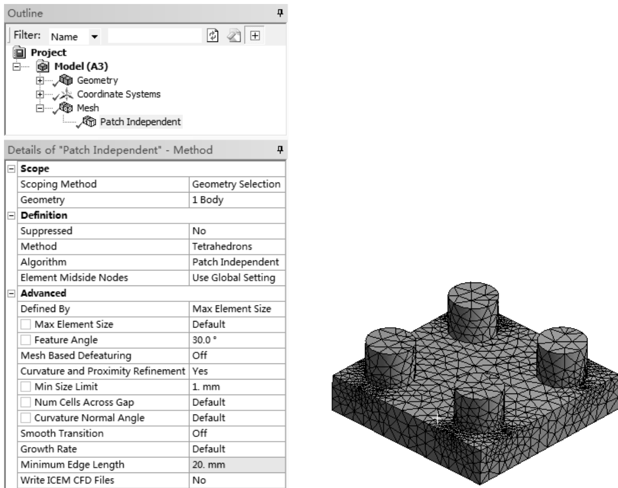


图 3-94　Patch Independent 方法

3.5.4　六面体方法——Hex Dominant

六面体（Hex Dominant）划分方法实际上是在模型的外面生成六面体单元，而在里面是四面体单元。它的算法是先在外表面生成一个平面网格，然后经过向内拖拉形成块/锥，最后在内部添加锥形四面体单元，如图 3-95 所示。该方法适用于块状的几何体，而对于细长类的几何体适用性不好。

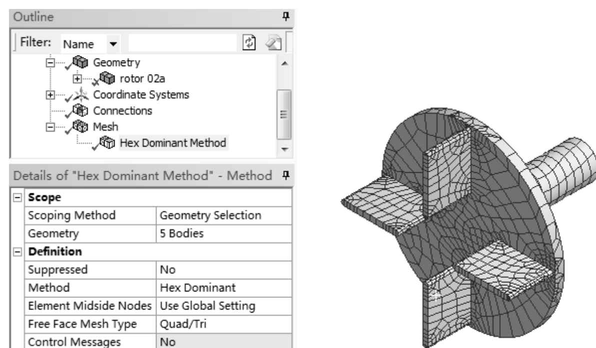


图 3-95　六面体方法

3.5.5　扫掠方法——Sweep

扫掠（Sweep）是一种先划分源面再延伸到目标面的创建六面体网格的方法。除源面和目标面外的面都称为侧面，扫掠方向或路径由侧面定义，源面和目标面间的单元层是由插值法建立并投射到侧面的。

要实现扫掠网格划分，可在【Outline（分析树）】中选中【Mesh】节点，并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Method】命令，在【Mesh】节点下增加【Automatic Method】节点（程序默认的是自动划分方法），在属性窗口中的【Definition】选项组中的【Method】下拉列表中选择【Sweep】，如图 3-96 所示。

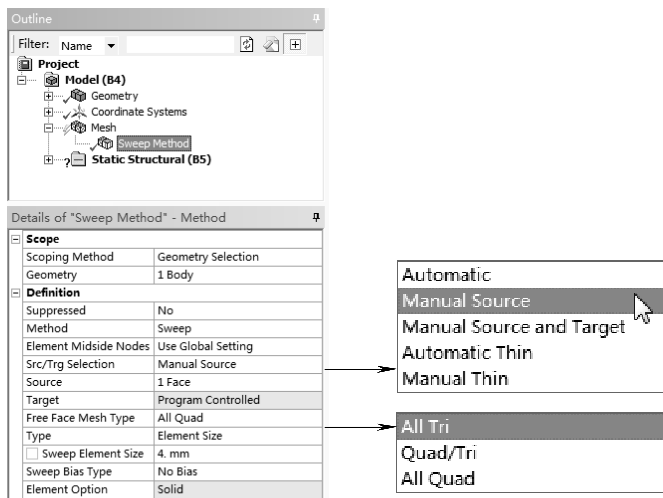


图 3-96　扫掠属性窗口

扫掠属性窗口中相关选项参数的含义如下：

- ✧ Src/Trg Selection（源面和目标面选择）：用于选择扫掠源面和目标面方式，可采用 Automaitc（自动）、Manual Source（手动源面）、Manual Source and Target（手动源面和目标面）、Automatic Thin（自动薄扫掠）、Manual Thin（手动薄扫掠）等。

注意：当侧面相对于源面较大（通常指侧面与源面长径比大于 1/5）、只有 1 个源面和 1 个目标面、扫掠方向沿路径改变时采用普通扫掠方法，反之，则采用薄扫掠方法。

- ✧ Free Face Mesh Type（自由面网格类型）：包括【All Tri】(所有三角形)、【Quad/Tri】(四边形/三角形）和【All Quad】(所有四边形)，如图 3-97 所示。

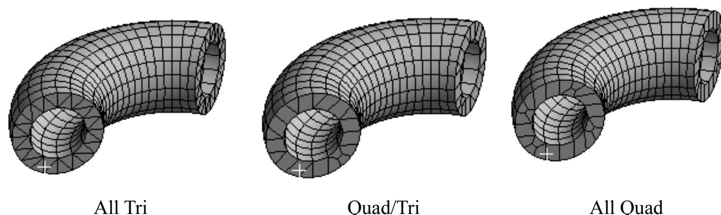


图 3-97　Free Face Mesh Type

- ✧ Type（类型）：用于定义单元尺寸，包括【Element Size】(单元尺寸—软约束）和【Number of Divisions】(分段数—硬约束)。

注意：当扫掠几何包含许多扭曲/弯曲时，扫掠划分器会产生扭曲单元导致网格划分失败，尤其是多步骤创建的几何（如一系列的拉伸和旋转）更容易产生问题，采用单个三维建模操作便可避免该问题（如采用扫掠操作替代一系列的拉伸和旋转操作）。

1）选中窗口左侧【Outline（分析树)】中的【Mesh】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Method】命令，在【Mesh】节点下增加【Automatic Method】节点（程序默认的是自动划分方法)，如图 3-98 所示。

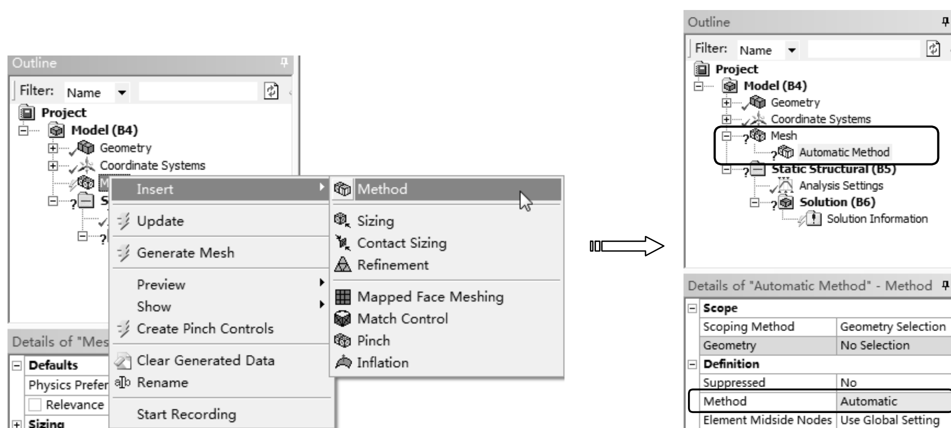


图 3-98　添加自动划分方法

2）单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选)】按钮，然后再单击【Body（选择体)】按钮，在【Details of “Automatic Method”】列表中单击【Scope】选项下的【Geometry】项，选择如图 3-99 所示实体，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。

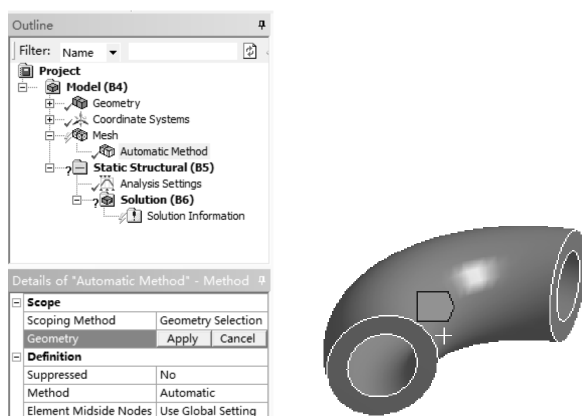
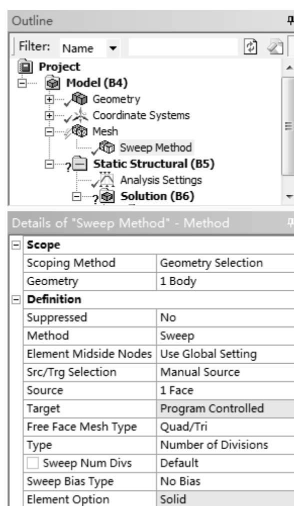


图 3-99　选择网格划分实体

3）在【Definition】选项组中的【Method】下拉列表中选择【Sweep】，在【Src/Trg selection】选项中选择【Manual Source】，选择如图 3-100 所示的面为源面，单击【Source】项中的【Apply】按钮完成。单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-101 所示。



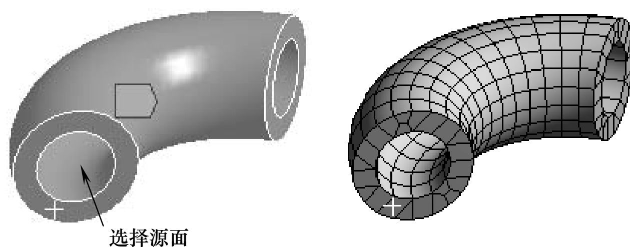


图 3-100　选择源面　　　　图 3-101　划分后的网格

3.5.6　多区域——MultiZone

多区域（MultiZone）是 ANSYS Workbench 网格划分的亮点，主要用来划分六面体网格。其特点是具有几何体自动分解功能，从而避免将一个体分解成可扫掠体以用扫掠方法得到六面体网格。

注意：扫掠网格划分可实现单个源面对单个目标面的扫掠，可很好地处理扫掠方向的多个侧面；而多区域划分可实现多个源面对多个目标面的网格划分。

要实现多区域网格划分，可在【Outline（分析树）】中选中【Mesh】节点，并单击鼠标

右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Method】命令，在【Mesh】节点下增加【Automatic Method】节点（程序默认的是自动划分方法），在属性窗口中的【Definition】选项组中的【Method】下拉列表中选择【MultiZone】，如图 3-102 所示。

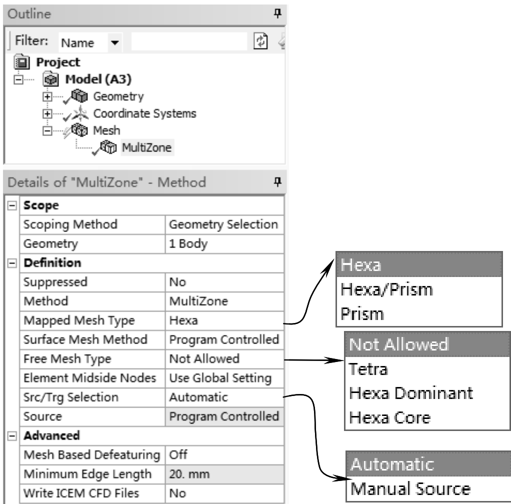


图 3-102　多区域属性窗口

扫掠属性窗口中相关选项参数的含义如下：

✧ Mapped Mesh Type（映射网格类型）：包括【Hexa】（六面体）、【Hexa/Prism】（六面体/棱柱）和【Prism】（棱柱）。

✧ Free Mesh Type（自由网格类型）：包括【Not Allowed】（不允许）、【Tetra】（四面体）、【Hexa Dominant】（六面体-支配）和【Hexa Core】（六面体-核心）。

✧ Src/Trg Selection（源面和目标面选择）：用于选择扫掠源面和目标面方式，可采用【Automaitc】（自动）、【Manual Source】（手动源面）等。

1）选中窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Mesh】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Method】命令，在【Mesh】节点下增加【Automatic Method】节点（程序默认的是自动划分方法），如图 3-103 所示。

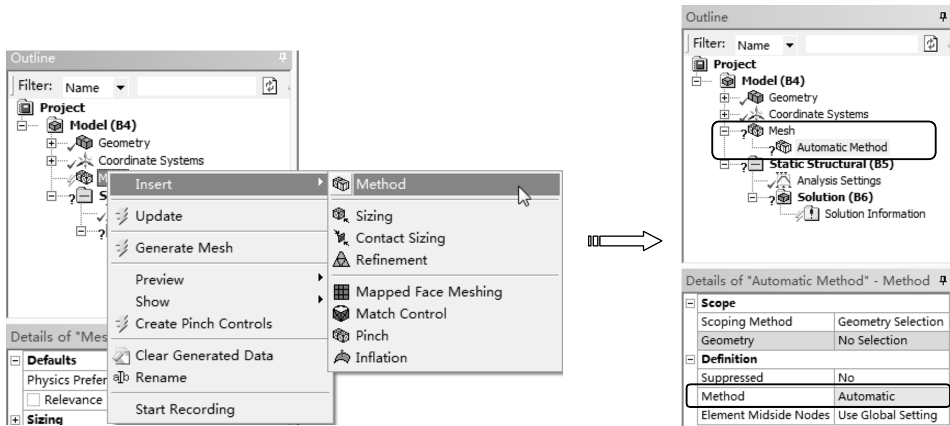


图 3-103　添加自动划分方法

2）单击图形工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of "Automatic Method"】列表中单击【Scope】选项下的【Geometry】项，选择如图 3-104 所示实体，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。

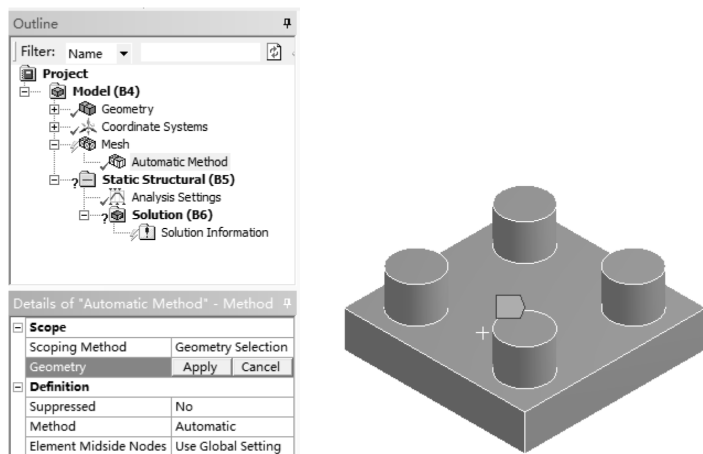


图 3-104　选择网格划分实体

3）在【Definition】选项组中的【Method】下拉列表中选择【MultiZone】，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh】|【Generate Mesh】命令，系统完成网格划分，如图 3-105 所示。

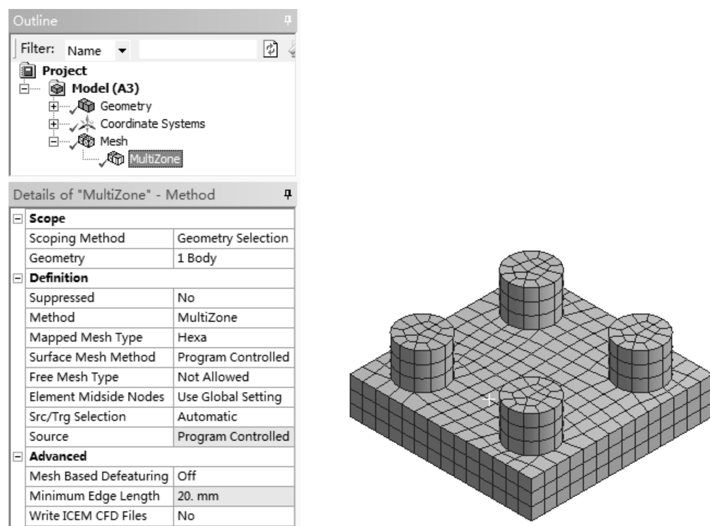


图 3-105　划分后的网格

3.6　网格工具

对网格进行全局控制和局部控制之后需要生成网格并进行查看，本节将介绍网格工具，包括生成和预览网格、剖面和命名选项。

3.6.1　生成和预览网格

1. Generate Mesh（生成网格）

生成网格是划分网格不可缺少的步骤。利用【生成网格】命令可生成完整的网格，对之前进行的网格划分做最终的运算。

在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 3-106 所示。

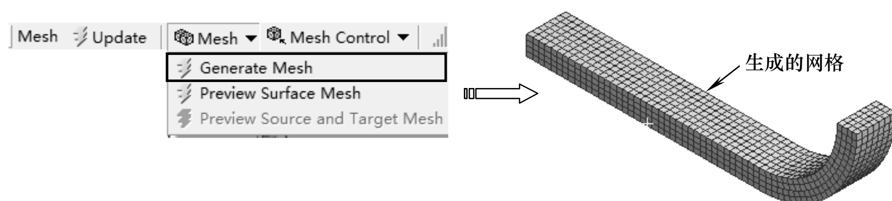


图 3-106　生成网格

2. Preview Surface Mesh（预览表面网格）

在生成网格之前可使用预览表面网格工具，它只生成表面网格，可预览检查表面网格质量，这样可以节省大量时间。

在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Preview Surface Mesh（预览表面网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成预览效果如图 3-107 所示。

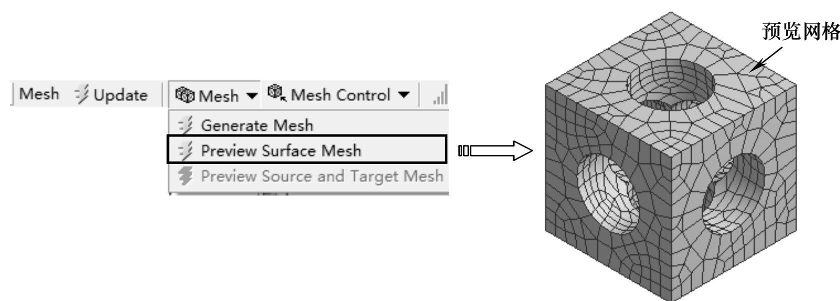


图 3-107　生成预览网格

3.6.2　剖面

剖面用于显示网格划分的内部单元。设置剖面后，可显示剖面任一侧单元，关闭或删除剖面可显示整个单元。剖面创建方法和步骤如下：

1）单击工具栏上的【New Section Plane】按钮，在窗口左下角出现【Section Planes】窗口，在图形中单击两点绘制一条线作为剖切线，将显示创建的剖面，如图 3-108 所示。

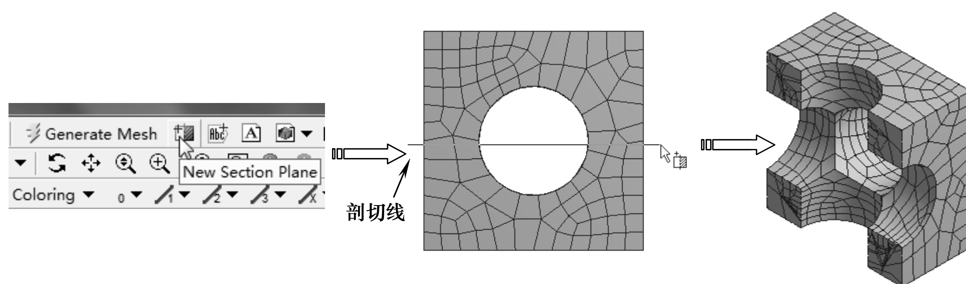


图 3-108　创建剖面

2）在【Section Planes】窗口中单击【Show Whole Elements】按钮，图形区显示出剖切面处的整个网格，如图 3-109 所示。

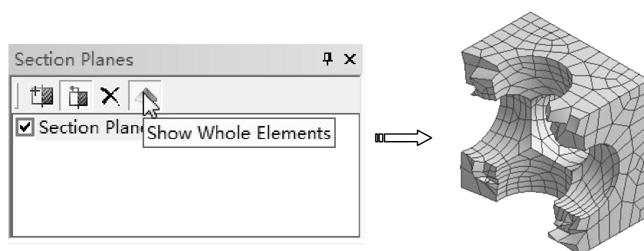


图 3-109　显示整个网格

3）在【Section Planes】窗口中单击【Edit Section Plane】按钮，图形区显示一条半虚半实线，单击实线侧将其变成虚线，此时图形区只显示剖切处的单元，如图 3-110 所示。

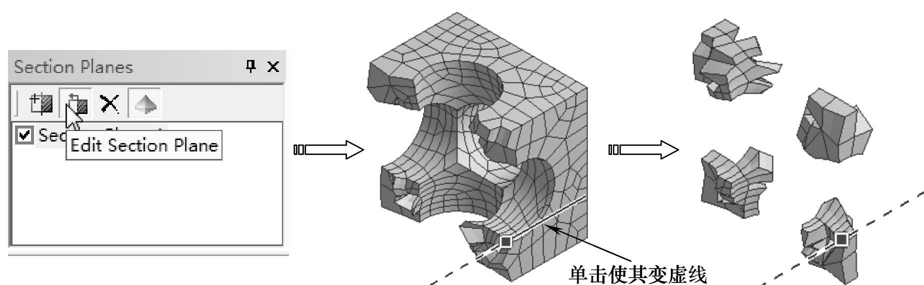


图 3-110　显示剖切处单元

4）在【Section Planes】窗口中单击【Edit Section Plane】按钮，图形区显示一条半虚半实线，单击虚线侧将其变成实线，此时图形区显示实线侧处的单元，如图 3-111 所示。

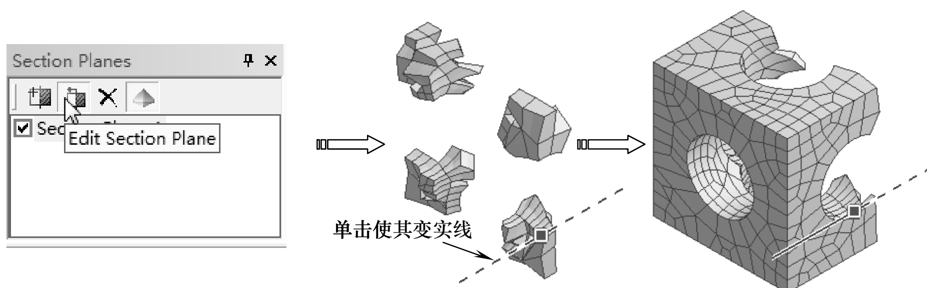


图 3-111　显示实线侧网格

5）在【Section Planes】窗口中单击【Edit Section Plane】按钮，图形区显示一条半虚半实线，拖动蓝色方框移动剖切线位置，如图 3-112 所示。

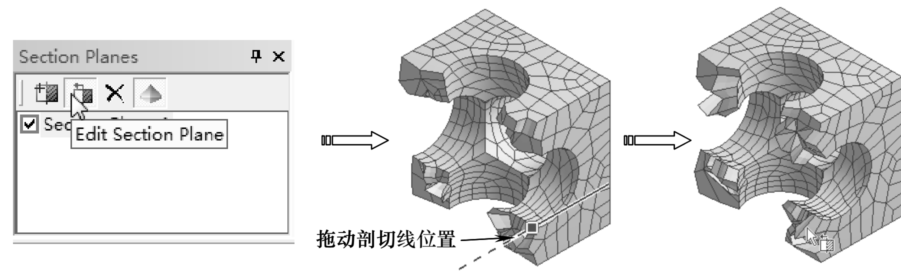


图 3-112　移动剖切线位置

3.6.3　命名选项

命名选项（Name Selection）允许用户对顶点、边、面或体创建组，命名选项可用来定义网格控制，施加载荷和结构分析中的边界等。

单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，选择左端面并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Create Named Selection】命令，弹出【Selection Name】对话框，输入【Inlet_hot】作为面名称，单击【OK】按钮完成，如图 3-113 所示。

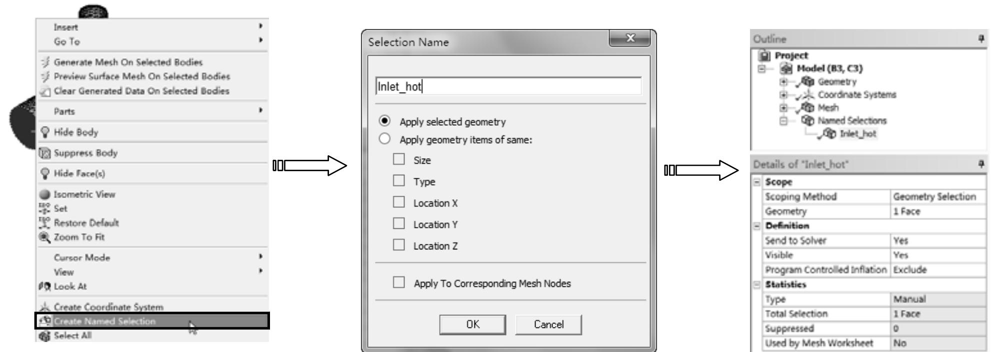


图 3-113　截面命名

注意：命名选项可自动导出到求解器模块，例如 CFX-Pre 或 Flunet，也可以从 DesignModeler 或其他 CAD 系统中导入。

3.7　本章小结

本章讲解了 ANSYS Workbench 软件的 Meshing 网格划分模块，包括网格划分界面、全局网格控制、局部网格控制、网格划分方法、网格工具等，并通过典型案例对网格划分的一般分析步骤进行详细讲解。通过本章学习，读者将掌握 ANSYS Workbench 的 Meshing 网格划分的基础知识和操作方法，为 ANSYS Workbench 的实际应用奠定基础。

第 4 章　ANSYS 14.5 Workbench 求解和后处理

完成有限元模型后，就可以根据结构在工程中的实际情况为模型施加载荷并求解了。通常 Mechanical 用来添加实体属性、网格划分、载荷和约束、结果后处理等操作，主要用于结构分析和热分析中。本章将对 ANSYS Workbench 中的 Mechanical 进行详细讲解，包括 Mechanical 用户界面、材料属性设置、坐标系、模型求解、结果后处理等。

4.1　Mechanical 简介

ANSYS Workbench 中的 Mechanical 是利用 ANSYS 的求解器进行结构和热分析的，它提供如下有限元分析：

- ✧ 结构（静态和瞬态）：线性和非线性结构分析。
- ✧ 动态特性：模态、谐波、随机振动、柔性和刚体动力学。
- ✧ 热传递（稳态和瞬态）：求解温度场和热流等，温度由导热系数、对流系数、材料决定。
- ✧ 磁场：执行三维精磁场分析。
- ✧ 形状优化：使用拓扑优化技术显示可能发生体积减小的区域。

注意：Mechanical 中可实现的功能是由用户的 ANSYS 许可文件决定的。根据许可文件的不同，Mechanical 可实现的功能也会有所不同。

4.2　Mechanical 用户界面

Mechanical 是一个单独的操作界面，下面介绍 Mechanical 用户界面的基本知识。

4.2.1　启动 Mechanical

在 ANSYS Workbench 的项目管理区（Project Schematic）中，双击项目 Model（模型）等栏目均可进入 Mechanical 操作环境，如图 4-1 所示。

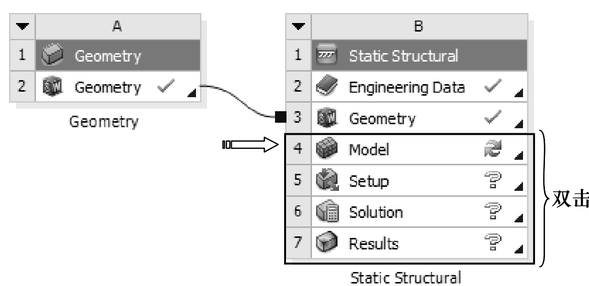


图 4-1　启动 Mechanical

4.2.2　Mechanical 界面

Mechanical 界面主要包括菜单栏、分析树、图形窗口、工具栏、详细设置窗口、状态栏等，如图 4-2 所示。

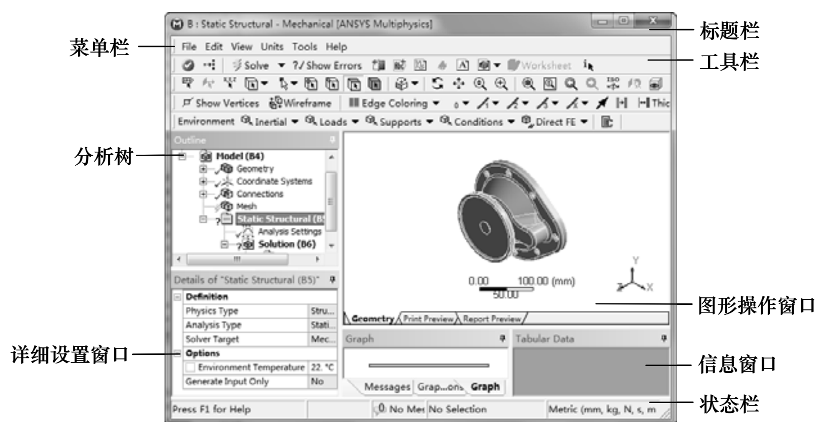


图 4-2　Mechanical 用户界面

1．标题栏

Mechanical 标题栏列出了分析类型、产品名和 ANSYS 许可，如图 4-3 所示。

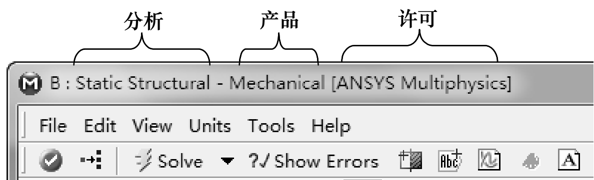


图 4-3　Mechanical 标题栏

2．菜单栏

Mechanical 界面中常用的菜单命令与 Meshing 界面下的菜单命令基本相同，读者可参考相关知识进行学习。

✧ 【File】菜单：用于执行文件操作，包括【Refresh All Data（刷新所有数据）】、【Save Project（保存工程文件）】、【Export（导出）】、【Clear Generated Data（清除生成数据）】

和【Close Meshing（关闭界面）】。

✧【Edit】菜单：包括对工程结果数据操作的编辑命令，包括【Duplicate（复制）】、【Duplicate Without Results（不带结果文件的复制）】、【Copy（复制）】和【Paste（粘贴）】、【Cut（剪切）】、【Delete（删除）】和【Select All（选择所有）】。

✧【View】菜单：包括图形和窗口的各种显示命令，包括【Shaded Exterior and Edges】、【Shaded Exterior】、【Wireframe】、【Ruler】、【Triad】等。

✧【Units】菜单：用于选择需要的单位格式。

✧【Tools】菜单：用于进行系统设置。

✧【Help】菜单：用于启动帮助系统。

3．工具栏

利用 Mechanical 界面中的工具栏命令按钮启动命令是启动命令最方便的方法。下面介绍常用的两个工具栏。工具栏显示了常用的工具按钮，单击工具右侧的黑色三角，可展开下一级工具栏。

（1）【标准】工具栏　【标准】工具栏中的命令用于模型求解控制以及添加注释等操作，如图 4-4 所示。



图 4-4 【标准】工具栏

（2）【选择和视图】工具栏　【选择和视图】工具栏中的命令用于图形选择和视图操作，如图 4-5 所示。

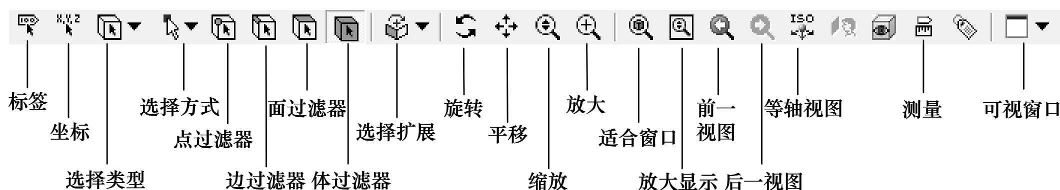


图 4-5 【选择和视图】工具栏

（3）【显示】工具栏　【显示】工具栏中的命令用于图形显示操作，如图 4-6 所示。



图 4-6 【显示】工具栏

注意：对于 Context 工具栏，根据当前【Outline（分析树）】所选分支节点不同，显示的内容也不同。

4．分析树

【Outline（分析树）】也称为流程树，为用户提供了模型、材料、网格、载荷和求解管理的分析过程，如图 4-7 所示。

✧ Model：包含分析中所需的输入数据。

✧ Static Structural：包含载荷和边界条件定义。

✧ Solution：结果和求解信息。

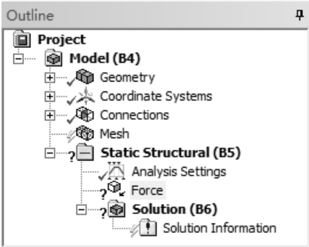


图 4-7　分析树

分析树中所显示的图标含义见表 4-1。

表 4-1　分析树中图标的含义

图　　标	图 标 含 义
	对号表明分支完全定义
	问号表示项目数据不完全（需要输入完整的数据）
	闪电表明需要解决
	感叹号表明存在问题
	“X”意思是项目抑制（不会被求解）
	透明对号表示全体或部分隐藏
	绿色闪电表示项目目前正在评估
	减号表示映射面网格划分失败
	斜线标记表明部分结构已进行网格划分
	红色闪电表示失败的解决方案

5．详细设置窗口

详细设置窗口包含数据输入和输出区域，内容的改变取决于在【Outline（分析树）】选定的分支节点，如图 4-8 所示。

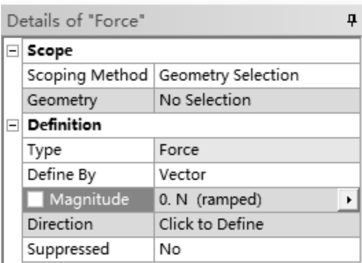


图 4-8　详细设置窗口

详细设置窗口中选项区域颜色的含义如下：

✧ 白色区域：表示输入数据，白色文本区域下的数据正在编辑。

✧ 灰色（红色）区域：表示信息显示，在灰色区域的数据不能修改。

✧ 黄色区域：表示不完整的输入信息，黄色区域的数据显示信息丢失。

6．图形窗口

图形窗口中显示几何和结果，还列出了工作表（表格）HTML 报告，以及打印预览选项的功能。

7．信息窗口

信息窗口通常显示求解结果的图（Graph）或表（Tabular Data）等数据结果。

8．状态栏

状态栏显示的通常为分析项目的单位、部件体的选择信息及求解分析过程中的提示信息等内容。

4.2.3　鼠标控制

在 Mechanical 中正确使用鼠标会加快操作速度，提高工作效率。下面介绍在 Mechanical 中如何更好地使用鼠标。

鼠标右键用来选择几何实体或控制曲线生成，可选择的几何项目有顶点、边、面、体，或者可以操作视图的旋转、平移、放大、缩小、框选等。常见的鼠标操作图形功能见表 4-2。

注意：鼠标操作视图过程需要结合前面的【选择和视图】工具栏上的相关按钮联合进行。

表 4-2　鼠标操作图形功能

鼠标组合使用方式	作　　用	鼠标组合使用方式	作　　用
单击+拖动鼠标的中键	动态旋转	滚动鼠标中键	视图放大或缩小
Ctrl+鼠标中键	拖动	鼠标右键+拖动	框选并放大
Shift+鼠标中键	动态缩放	右击，选择【Zoom to Fit】命令	全视图显示

鼠标选择方式可分为单个选取或框选两种方式：

✧ 单选：按住鼠标左键拖动可进行多选，也可按住<Ctrl>键的同时单击鼠标左键来选取或不选多个实体。

✧ 框选：在框选模式下，从左向右拖动鼠标，选中完全在边界内的实体；由右向左拖动鼠标，选中部分和全部在边界框内的实体，如图 4-9 所示。

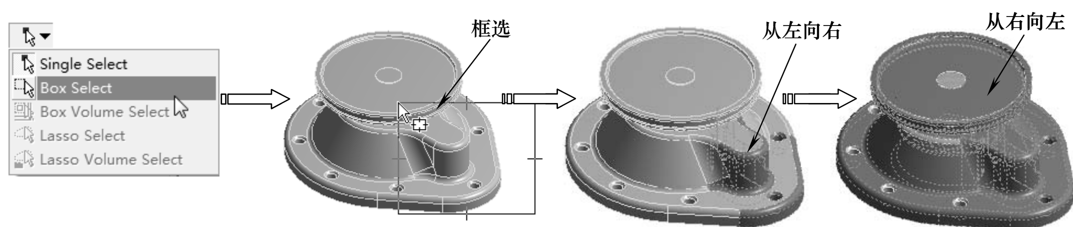


图 4-9　框选

4.3　Mechanical 基本操作

利用 Mechanical 界面中的分析树所列流程执行项目分析相关操作。下面分别加以介绍。

1．几何模型

【Geometry（几何）】节点选项给出了模型的组成部分，通过该分析可了解几何体的相关信息。

（1）几何体　在模拟分析过程中，实体的体/面/部件（二维或三维）、只由面组成的面体、只由线组成的线体 3 种类型的实体会被分析。

- ✧ 实体：三维实体是由带有二次状态方程的高阶四面体或六面体实体单元进行网格划分的。二维实体是由带有二次状态方程的高阶三角形或四边形实体单元进行网格划分的。结构的每个节点含有 3 个平动自由度（DOF）或对热场有一个温度自由度。
- ✧ 面体：面体指几何上为二维，空间上为三维的体素。面体为有一层薄膜（有厚度）的结构，厚度为输入值，面体通常由带有 6 个自由度的线性壳单元进行网格划分。
- ✧ 线体：线体指几何上为一维、空间上为三维的结构，用来描述与长度方向相比其他两个方向的尺寸很小的结构，截面的形状不会显示出来。线体由带有 6 个自由度的线性梁单元进行网格划分。
- ✧ 多体部件体：在 DM 中可以有多体部件体存在，而在其他很多应用程序中体和部件通常是一样的。多体部件中共同边界的地方节点是共用的。如果节点是共享的，则不需要定义接触。

（2）为体添加材料　在进行项目分析时，需要为体添加材料属性，添加时在窗口左侧【Outline（分析树）】中选择【Geometry】节点下的相应实体，此时在【Details of“XXX”（参数列表）】中显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击 ▸ 按钮，选择相应材料，如图 4-10 所示。

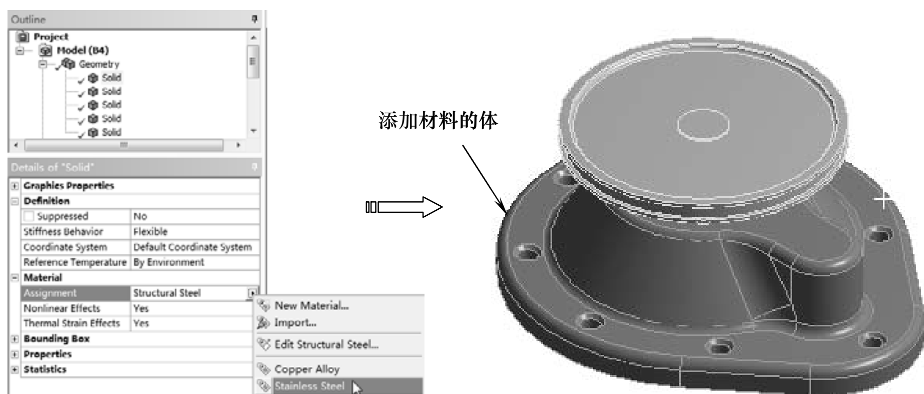


图 4-10　设置实体材料

2．坐标系

在 Mechanical 中，Coordinate Systems 用于网格控制、质量点、指定方向载荷和结果显示等。当模型是基于 CAD 的原始模型时，Mechanical 会自动添加 Global Coordinate

System（整体坐标系），整体坐标系为固定的笛卡儿坐标系；也可以创建 Local Coordinate Systems。

在【Outline（分析树）】中选择【Coordinate System】节点，显示【坐标系】工具栏以及相关【坐标系】详细设置窗口，如图 4-11 和图 4-12 所示。

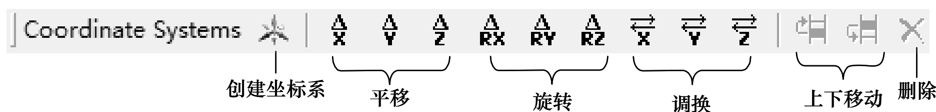


图 4-11　【坐标系】工具栏

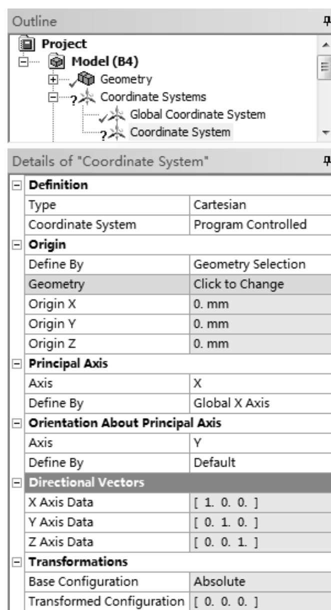


图 4-12　【坐标系】详细设置窗口

（1）定义坐标系　在【Outline（分析树）】中选择【Coordinate System】节点，单击【Coordinate Systems】工具栏上的【Create Coordinate System】按钮，在分析树中自动插入【Coordinate System】节点。

（2）坐标系类型（Definition）　属性窗口中的【Definition】可定义坐标系类型和编号，包括以下选项：

✧ Type（类型）：用于定义坐标系类型，包括笛卡儿坐标系和圆柱坐标系，圆柱坐标系可用于零件、位移及施加在面体上的力。

✧ Coordinate System（坐标系）：选择程序控制（Program Controlled）由程序分配坐标系的参考号，选择 Manual 人工控制可指定坐标系的参考号大于或等于 12。

（3）坐标原点　属性窗口中的【Origin】可定义坐标系原点，【Define By】下拉列表中包括以下原点定义方式：

✧ Geometry Selection（几何选择）：在窗口中选择几何元素定义坐标原点，如图 4-13 所示。坐标系原点的位置与所选几何关联，其位置随几何模型改变而改变。

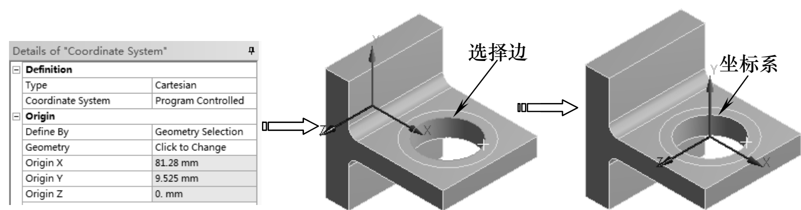


图 4-13　Geometry Selection（几何选择）

✧ Global Coordinates（整体坐标）：选择整体坐标系为参考创建原点，可在【Origin X】、【Origin Y】、【Origin Z】中输入原点在整体坐标系中的位置。该方式创建的坐标系独立于任何几何模型，如图 4-14 所示。

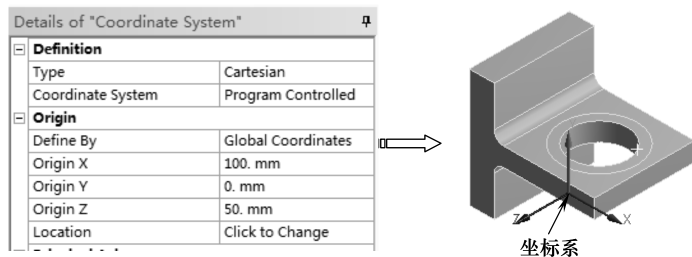


图 4-14　Global Coordinates（整体坐标）

注意：选择一个点，坐标系原点为该点；选择多个点，原点为多点包围的面积或体积中心；选择一个面或一条边，原点为该面或该边的中心；选择圆柱，原点为圆柱的中心；选择圆或圆弧，原点为圆弧中心。

（4）主轴和方向　坐标系需要定义【Principal Axis（主轴矢量）】和【Orientation About Principal Axis（主轴方向矢量）】，这两个矢量形成坐标系平面和主轴对齐，如图 4-15 所示。

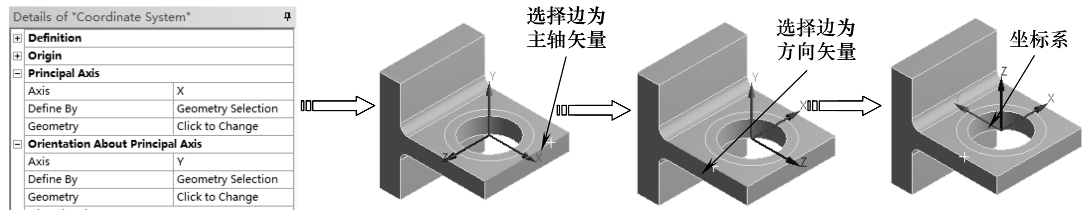


图 4-15　主轴和方向

3．连接关系

当几何体存在多个部件时，需要确定部件之间的相互关系，在 ANSYS Workbench 中可通过【Connections】来定义。连接关系【Connections】可以通过【Mesh Connections（网格连接）】、【Contacts（接触关系）】、【Joints（关节连接）】等来实现。当加入接触关系后，程序自动检测并添加接触关系，而其他连接关系则需要手工加入。

连接属性窗口中包括自动检测功能和透明显示功能，自动检测功能用于设置是否在刷新几何模型时生成自动连接关系，如图 4-16 所示。

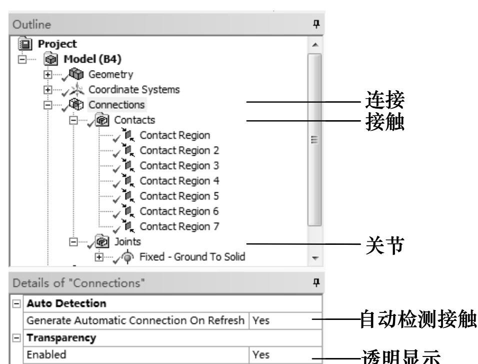


图 4-16　连接属性窗口

（1）【Contacts（接触关系）】 接触包括面/面、面/边、边/边之间的接触和点焊接触等。当装配体输入时，两个零件之间自动形成接触，接触连接可传递结构载荷和热流。在 Mechanical 中系统提供了 5 种不同的接触类型：Bonded（绑定）、No Separation（不分离）、Frictionless（光滑无摩擦）、Rough（粗糙）及 Frictional（摩擦）。

（2）【Joints（关节连接）】 【Joints（关节连接）】用来模拟几何体中两点之间的连接关系，每一个点有 6 个自由度，两点间的相对运动由 6 个相对自由度描述，每个运动副的运动方向由关节参考坐标系的方向确定。

4．网格划分

【Mesh（网格）】节点用于对模型进行网格划分，网格划分的相关内容在第 3 章已经讲解，这里不再赘述。结构分析中要注意以下几点：

✧ 接触面提供适当精细的网格密度可使接触应力平滑分布。
✧ 对应力应变感兴趣的区域，网格划分应好于对位移感兴趣的区域。
✧ 考虑结构非线性时，几何模型需要更细的网格，如塑性变形梯度很大的地方，由于需要合理的积分点密度，因此需要好的网格质量。

5．分析设置

Mechanical 中的 Analysis Settings 提供了一般求解过程控制，如结构静力学分析中分析设置包括“Step Controls（求解步控制）”“Solver Controls（求解控制）”“Restart Controls（重启动控制）”“Nonlinear Controls（非线性控制）”“Output Controls（输出控制）”“Analysis Data Management（分析数据管理）”等，如图 4-17 所示。

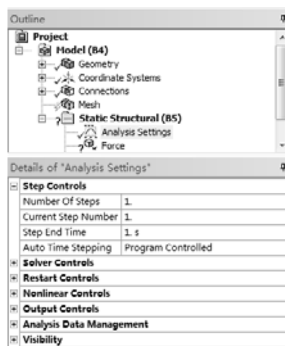


图 4-17　Analysis Settings 分析设置

6．载荷和约束

载荷和约束是 ANSYS Workbench 求解计算的边界条件，它们是以所选单元的自由度的形式来定义的。如结构分析中 Mechanical 中有 4 种类型的载荷：惯性载荷、结构载荷、结构约束和热载荷等。

7．模型求解

当所有的设置完成之后，单击标准工具箱里的【求解】按钮 Solve，即可求解模型，相关内容参考“4.4 模型求解”。

8．结果后处理

Workbench 结果后处理可得到多种结果，如各方向或总变形、应力应变、接触工具等，相关内容参考“4.5 结果数据后处理”。

4.4 模型求解

所有设置完成之后就可以对模型进行求解了。下面介绍模型求解的相关知识。

4.4.1 设置求解器

在 Mechanical 中有两种求解器：直接求解器和迭代求解器。通常情况下是自动选取的，也可预定设置。具体方法如下：

选择【Tools】|【Options】命令，弹出【Options】对话框，在左侧选中【Mechanical】|【Analysis Settings and Solutions】选项，在右侧的【Solver Type】下拉列表中可选择所需的方法，如图 4-18 所示。

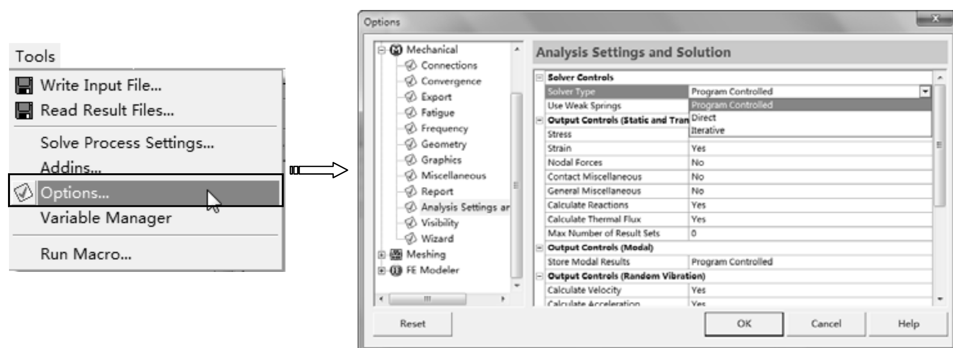


图 4-18　设置求解方法

直接求解器对包含薄面和细长体的模型比较有用。迭代求解器虽然对梁和壳来说不是很有效，但是可以很好地处理大的模型。

在 ANSYS Workbench 中默认采用两个处理器进行求解，可采用如下方法设置多个处理器：选择【Tools】|【Solve Process Settings】命令，弹出【Solve Process Settings】对话框，单击【Advanced】按钮，弹出【Advanced Properties】对话框，在【Max number of utilized processors】文本框中输入相应处理器数量，如图 4-19 所示。

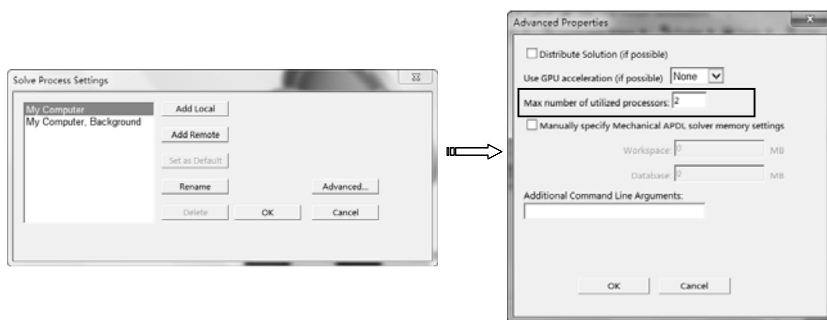


图 4-19　设置求解器数量

4.4.2　Workbench 环境直接求解

在 Mechanical 中启动求解命令的方法有两种：

1）单击标准工具箱里的【求解】按钮 Solve，即可求解模型，如图 4-20 所示。或者在【Outline（分析树）】中选中【Solutions】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Solve】命令，即可求解模型，如图 4-21 所示。

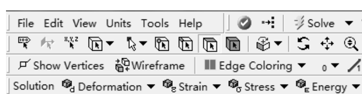


图 4-20　工具栏中的【求解】按钮

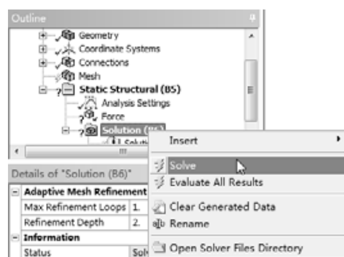


图 4-21　分析树快捷命令

2）启动求解后系统弹出进度条，表示正在求解；求解完成后进度条自动消失，如图 4-22 所示。

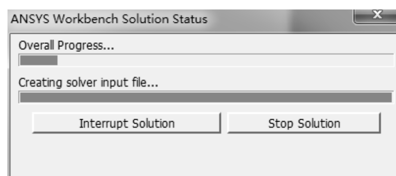


图 4-22　求解进度条

4.4.3　导入 ANSYS 经典环境求解

Mechanical APDL 是传统的 ANSYS 经典界面，更专业，对于底层的操控更方便；在建模、数据导入和操作性方面，不如 Workbench。Workbench 是 ANSYS 公司开发的协同仿真环境，在数据导入、网格划分方面都很方便，尤其是在曲面和装配体的模型的识别方面，一般软件都没有单位，各种数据输入单位统一需要自己计算或者查表，Workbench 有自己的单位系统。

注意：Mechanical APDL 对几何模型的识别、数据导入处理都不如 Workbench，并且 Workbench 可对装配体自动识别，Workbench 的装配体模型导入到 Mechanical APDL 已经建立好相关的接触。

1）启动 ANSYS Workbench，在【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Mechanical APDL】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A3 上，当 A3 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 4-23 所示。

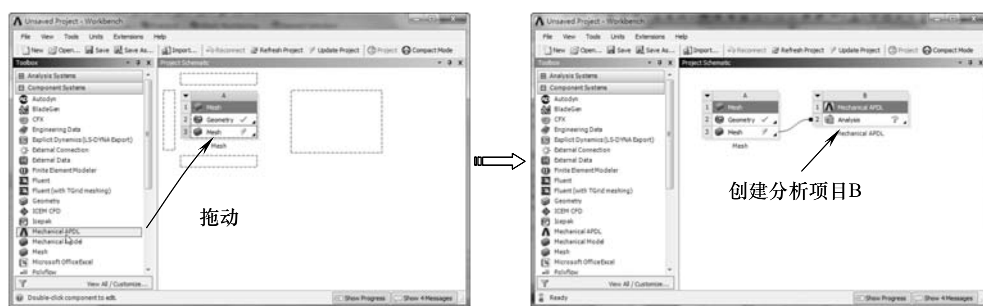


图 4-23　创建分析项目 B

2）选中分析项目 A 的 A3 栏，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Update】命令更新 A3 栏的输出数据，如图 4-24 所示。

3）选中分析项目 B 的 B2 栏，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Refresh】命令更新 B2 栏的输出数据，如图 4-25 所示。

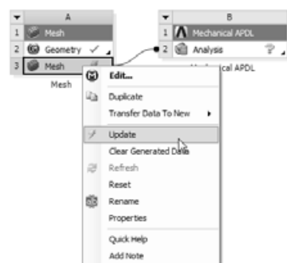


图 4-24　更新 A3 栏数据

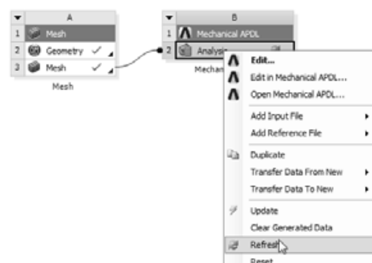


图 4-25　更新 B2 栏数据

4）选中分析项目 B 的 B2 栏，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Edit in Mechanical APDL】命令，如图 4-26 所示。系统自动打开 Mechanical APDL 窗口显示有限元模型，如图 4-27 所示。



图 4-26　选择【Edit in Mechanical APDL】命令

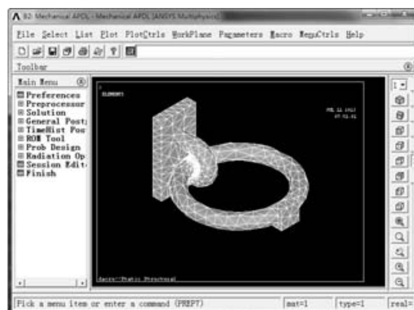


图 4-27　ANSYS 经典界面

5）在 ANSYS 经典界面下输入约束和载荷，然后在该界面下进行分析求解。

4.5　结果数据后处理

在对零部件进行有限元求解后，检查并分析求解的结果是整个分析过程中十分重要的环节。在后处理环节中，可以得到多种不同的结果，比如各个方向和全部的变形、应力应变分量、主应力应变、接触结果输出、支反力等，不同的分析类型有相对应的分析结果。

注意：求解结果通常是在计算前指定的，但是也可在计算完成后指定。假如某种结果的类型已经提前确定，则不需要新的求解，比如总体变形提前设定，现在增加了方向上的变形，则只要更新结果即可。

不同分析类型的求解结果会不同，下面以静力分析为例讲解结果后处理，如图 4-28 所示为结构后处理的【Solution】工具栏。

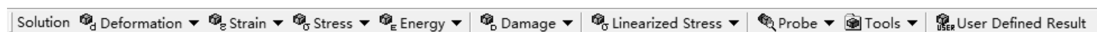


图 4-28 【Solution】工具栏

4.5.1　变形显示

在 ANSYS Workbench 的计算结果中，可显示模型的变形量，主要命令集中在【Solution】工具栏的【Deformation】选项下，如图 4-29 所示。

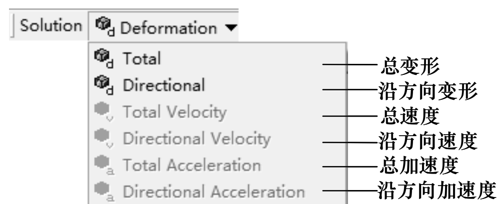


图 4-29　变形分析选项

✧ Total（总变形）：总变形是个标量，它由式（4-1）决定。可使用矢量方式显示总变形，如图 4-30 所示。变形结构对线、面、体均使用，变形结果仅仅和平移自由度有关，线和面的转动自由度不能够直观显示，但可以跟踪点的角度变化获得。

$$U_{\text{Total}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \qquad \text{式（4-1）}$$

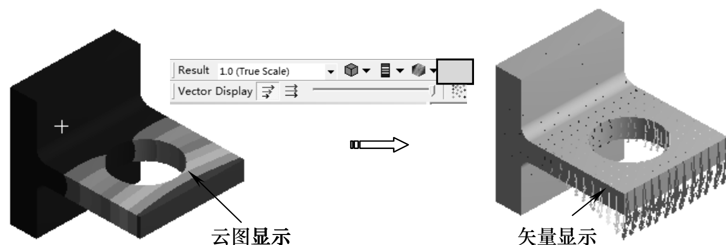


图 4-30　变形结果的显示

✧ Directional（沿方向变形）：包括 X、Y、Z 方向的变形，可显示指定坐标系下的变形，如利用柱坐标系显示圆柱体在径向的变形。

4.5.2 应力和应变

在 ANSYS Workbench 的计算结果中，可显示模型的应力和应变，主要命令集中在【Solution】工具栏的【Strain】和【Stress】选项下，如图 4-31 所示。

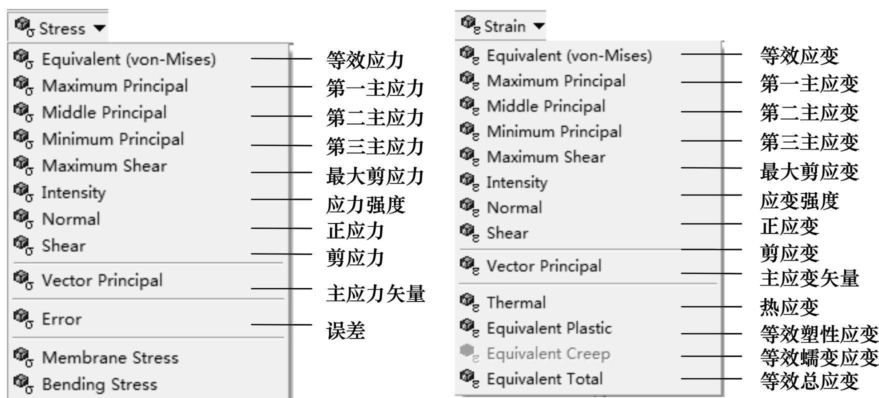


图 4-31 【Strain】和【Stress】分析选项

通常，应力应变有 6 个分量（x、y、z、xy、yz、zx），热应变有 3 个分量（x、y、z），对应力和应变而言，其分量可在 Normal（x、y、z）和 Shear（xy、yz、zx）下指定，而热应变是在 Thermal 下指定。

（1）等效应力/等效应变 Equivalent（von-Mises） 等效应力和主应力的关系可以表示为

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2]}$$

等效应力也称为 von-Mises 应力，可将任意三向应力表示为一个等效的正值应力，在最大等效应力失效理论中用来预测塑性材料的屈服行为。

等效应变的计算公式如下：

$$\varepsilon_e = \frac{1}{1+\upsilon}\sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2+(\varepsilon_2-\varepsilon_3)^2+(\varepsilon_3-\varepsilon_1)^2]}$$

υ 为有效的泊松比，在弹性及热应变计算中为参考温度下的材料泊松比，对塑性应变为 0.5。

（2）主应力/主应变 Maximum Principal，Middle Principal，Minimum Principal 根据弹性力学理论，任一点的一个无限小体积可以自由旋转到仅有正应力而无剪应力或正应变的状态，这 3 个正应力称为主应力，其中 σ_1 为第一主应力，σ_2 为第二主应力，σ_3 为第三主应力，其关系为：$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$。

（3）应力强度和应变强度（Intensity） 应力强度定义为

$$\sigma_1 = \max(|\sigma_1-\sigma_2|,|\sigma_2-\sigma_3|,|\sigma_3-\sigma_1|)$$

应力强度与最大剪应力的关系为

$$\sigma_l = 2\tau_{\max}$$

应变强度定义为

$$\varepsilon_1 = \max(|\varepsilon_1 - \varepsilon_2|, |\varepsilon_2 - \varepsilon_3|, |\varepsilon_3 - \varepsilon_1|)$$

（4）主应力/主应变矢量（Vector Principal） 主应力或主应变矢量可以三维显示，正值向外，负值向内，该显示有助于描述结构某点所承受的最大正应力或最大正应变的方向，比如最大正应力方向的位置，表示最大载荷通过体所传递的路径。

（5）误差（Error） 误差结果基于盈利，有助于识别高误差区域，表示该区域的网格需要细化，以获得更准确的结果。误差结果的计算基于线性盈利，对非线性分析该结果可能不准确，误差结果仅限于各项同性材料。

（6）热应变（Thermal） 结构分析中指定热膨胀系数并施加温度载荷后计算热应变，求解前需在对象的明细窗口中定义【Thermal Strain Effects】为 Yes，每个热应变分量的计算为

$$\varepsilon^{\text{th}} = \alpha^{\text{se}}(T - T_{\text{ref}})$$

式中，ε^{th} 为 x、y、z 方向的热应变；α^{se} 为热膨胀正切系数；T_{ref} 为参考温度（零应力温度），静力分析或瞬态分析中可对整个模型指定参考温度，或者作为材料属性指定参考温度，如用于焊点冷却，这样每个材料可以有不同的零应力温度。

（7）等效塑性应变（Equivalent Plastic） 等效塑性应变测量永久应变，多数工程材料呈现的线性应力-应变关系达到的应力水平称为比例极限，超过比例极限，应力-应变关系为非线性，塑性行为的典型特征为应力超过屈服点后产生不可恢复的塑性应变。通常屈服点和比例极限相差很小，ANSYS 中塑性分析将比例极限和屈服点合二为一，如果要得到塑性应变，必须定义塑性材料属性。

（8）等效蠕变应变（Equivalent Creep） 蠕变是常载荷作用下材料持续变形率相关的材料非线性行为，材料在初始载荷条件下开始变形，并且随着材料变形或蠕变应变的增加，载荷随时间减弱，等效蠕变应变测量蠕变应变的数值，根据蠕变应变分量计算。

（9）等效总应变（Equivalent Total） 等效总应变给出总应变值，总应变分量包括弹性应变分量、塑性应变分量和蠕变应变分量，等效总应变根据总应变分量计算得到。

4.5.3　工具

在 ANSYS Workbench 中包括应力工具、接触工具、疲劳工具、梁工具、损伤工具，主要命令集中在【Solution】工具栏的【Tools】选项下，如图 4-32 所示。



图 4-32 【Tools】分析选项

下面介绍常用的应力工具、接触工具、疲劳工具。

（1）Stress Tool（应力工具） 在 Mechanical 中使用【Stress Tool】产生应力结果，单击【Solution】工具栏上的【Tools】|【Stress Tool】命令，在【Outline（分析树）】中的【Solution（A6）】节点下增加【Stress Tool】选项，在详细设置窗口的【Type】下拉列表中选择【Max Equivalent Stress】，然后选中【Safety Factor】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate

All Results】命令，图形区显示安全系数分布，如图 4-33 所示。

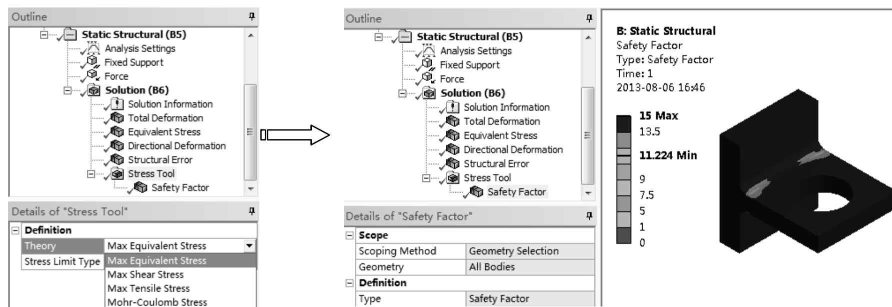


图 4-33　接触压力分布

材料破坏形式可分为脆性断裂和塑性屈服，脆性断裂的应力评定一般采用莫尔强度理论和最大拉应力理论，塑性屈服的应力评定一般采用最大剪应力理论和形状改变比能理论。

- ✧ 莫尔强度理论是以各种状态下的材料破坏试验结果为依据建立起来的有一定经验性的理论。该理论考虑材料拉压强度不等的情况，可以用于铸铁等脆性材料，也可用于塑性材料，当材料拉压强度相同时，等效于最大剪应力理论。
- ✧ 最大拉应力理论指无论材料处于什么应力状态，只要最大拉应力达到极限值，材料就会发生脆性断裂。该理论适用于脆性材料的拉、扭，一般材料的三向拉伸，铸铁的二向拉或压。
- ✧ 最大剪应力理论指无论材料处于什么应力状态，只要最大剪应力达到极限值，材料就会发生屈服破坏。该理论适用于塑性材料屈服破坏及一般材料三向受压。
- ✧ 形状改变比能理论指无论材料处于什么应力状态，只要形状改变比能达到极限值，材料就会发生屈服破坏。该理论适用于塑性材料屈服破坏及一般材料三向受压。

各种强度理论的适用范围：三轴拉伸时，脆性或塑性材料都会发生脆性断裂，应采用最大拉应力理论，应力工具为【Max Tensile Stress】；对于脆性材料，在二轴应力状态下应采用最大拉应力理论，如果抗拉压强度不同，应采用莫尔强度理论，应力工具为【Mor-Coulomb Stress】；对于塑性材料，应采用形状改变比能理论，应力工具为【Max Equivalent Stress】或最大剪应力理论，应力工具为【Max Shear Stress】；在三轴压缩应力状态下，对塑性和脆性一般采用形状改变比能理论。

（2）【Fatigue Tool（疲劳工具）】 在后处理中提供有关疲劳计算，【Fatigue Tool】提供以应力寿命和应变寿命为基础的疲劳计算评估零件的疲劳寿命，可以计算恒幅或变幅值载荷、比例或非比例载荷。

（3）【Contact Tool（接触工具）】 在 Mechanical 中使用【Contact Tool】产生接触结果，单击【Solution】工具栏上的【Tools】|【Contact Tool】命令，在【Outline（分析树）】中的【Solution（A6）】节点下增加【Contact Tool】选项，在详细设置窗口的【Type】下拉列表中选择【Pressure】，然后选中【Pressure】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，图形区显示压力分布，如图 4-34 所示。

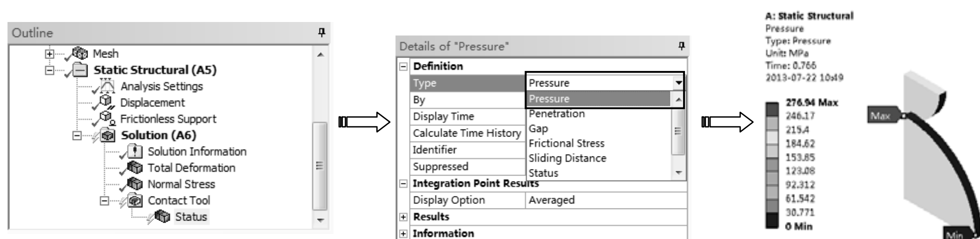


图 4-34　接触压力分布

✧　压力（Pressure）：显示法向接触压力。

✧　Penetration（穿透）：显示穿透深度。

✧　Gap（间隙）：显示在 Pinball 半径内的缝隙大小。

✧　Frictional Stress（摩擦应力）：由于摩擦力引起的切向接触应力。

✧　Sliding Distance（滑移距离）：表示面相对滑移的距离。

✧　Status（接触状态）：提供是否接触的信息，Over Constrained 表示过约束，Far 表示在弹球区外，Near 表示在弹球区内，Sliding 表示有相对滑移，Sticking 表示黏结在一起。

4.5.4　图形显示结果

当选择一个结果选项时，可改变结果的比例或显示内容，图形显示工具栏，如图 4-35 所示。

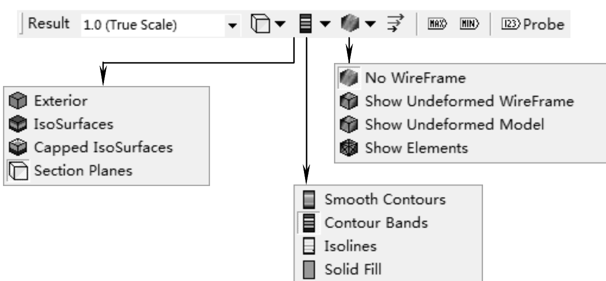


图 4-35　图形显示工具栏

（1）缩放比例　对于结果分析（静态、模态、屈服分析），模型的变形情况将发生变化，默认状态下，为了更清楚地看到结构变化，比例系数自动被放大，用户可输入自己所需要的缩放比例值，如图 4-36 所示。

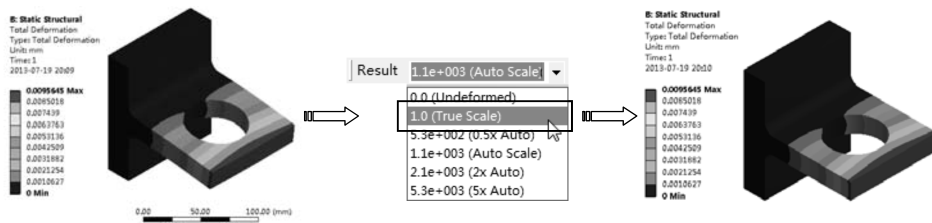


图 4-36　缩放比例

（2）显示方式　用于控制云图显示方式。

✧ Exterior：默认的显示方式并且是最常用的方式，如图 4-37 所示。

✧ IsoSurfaces：等高显示相同值域，如图 4-38 所示。

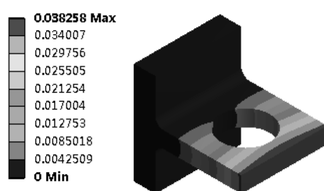


图 4-37　Exterior

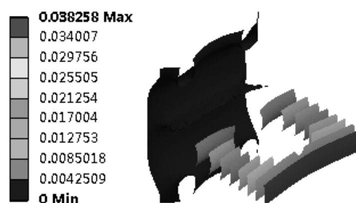


图 4-38　IsoSurfaces

✧ Capped IsoSurfaces：删除了模型的一部分之后的显示结果，删除的部分是可变的，高于或低于某个指定值的部分被删除，如图 4-39 所示。

✧ Section Planes：允许用户去真实地切割模型，需要先创建一个剖面，然后显示剖切后的云图，如图 4-40 所示。

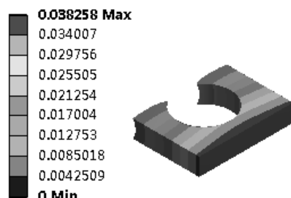


图 4-39　Capped IsoSurfaces

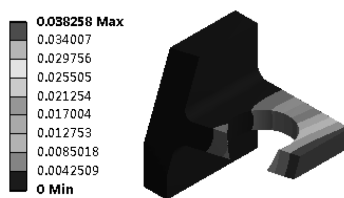


图 4-40　Section Planes

（3）色条设置　用于控制模型的显示云图方式，包括以下选项：

✧ Smooth Contours：光滑云图显示，颜色变化过渡变焦光滑，如图 4-41 所示。

✧ Contour Bands：云图显示有明显的色带区域，如图 4-42 所示。

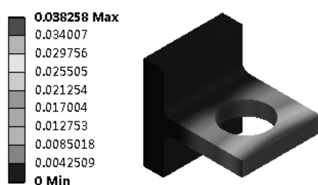


图 4-41　Smooth Contours

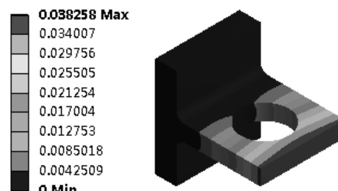


图 4-42　Contour Bands

✧ Isolines：以模型等值线方式显示，如图 4-43 所示。

✧ Solid Fill：不在模型上显示云图，如图 4-44 所示。

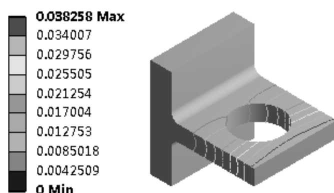


图 4-43　Isolines

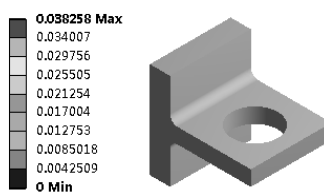


图 4-44　Solid Fill

（4）外形显示　用于显示未变形的模型或者划分网格的模型，包括以下选项：

✧　No WireFrame：不显示几何轮廓线，如图 4-45 所示。

✧　Show Undeformed WireFrame：显示未变形轮廓，如图 4-46 所示。

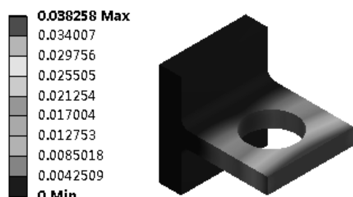


图 4-45　No WireFrame

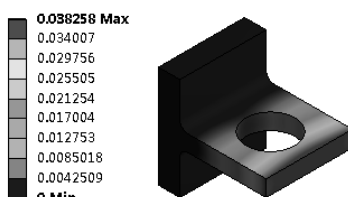


图 4-46　Show Undeformed WireFrame

✧　Show Undeformed Model：显示未变形的模型，如图 4-47 所示。

✧　Show Elements：显示网格单元，如图 4-48 所示。

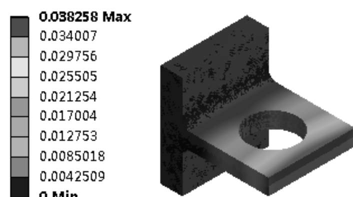


图 4-47　Show Undeformed Model

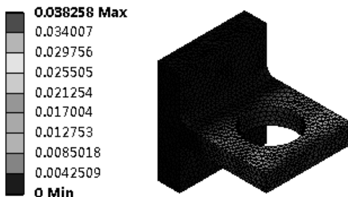


图 4-48　Show Elements

（5）矢量显示　以矢量形式显示分析结果，如图 4-49 所示。

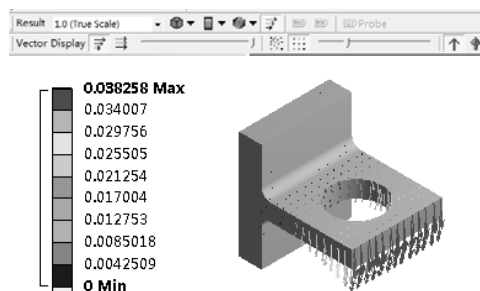


图 4-49　矢量显示

（6）最大值和最小值　单击相应的按钮，显示分析结果的最大值和最小值，如图 4-50 所示。

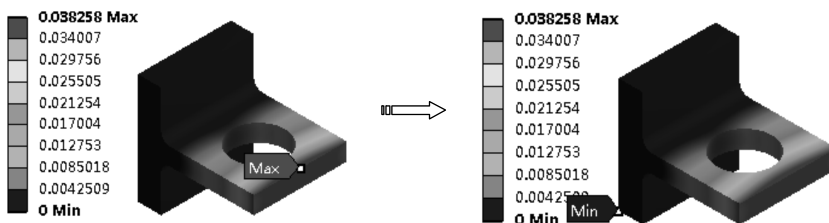


图 4-50　最大值和最小值

4.5.5 动画显示结果

在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点下的结果数据选项，然后在下面窗口中单击【Graph】选项卡，弹出动画显示结果的工具栏，然后单击▶按钮即可打开变形等结果数据的动态显示数据，如图 4-51 所示。

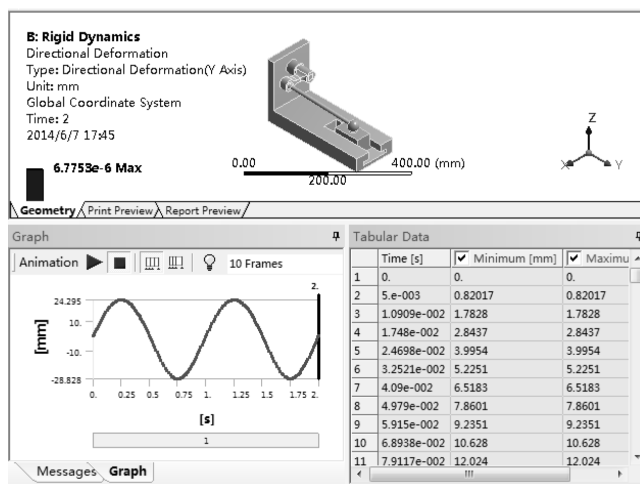


图 4-51　动画显示结果的工具栏

4.6 本章小结

本章讲解了 ANSYS Workbench 软件的求解和后处理知识，包括 Mechanical 用户界面、模型求解、结果后处理等。通过本章学习，读者将掌握 Workbench 模型求解以及结果后处理的操作技术。

第 2 部分
ANSYS 14.5 Workbench 应用实例



第 5 章　ANSYS 14.5 Workbench 结构静力学分析实例

线性结构静力学分析用于确定加载结构的位移、应力、应变或反力等，忽略阻尼和惯性影响，假设结构加载及响应随时间变化缓慢。本章首先对 ANSYS 14.5 Workbench 软件的结构静力学分析原理进行介绍，然后结合典型案例对结构静力学分析的方法和步骤进行详细讲解。

5.1　结构静力学分析概述

线性结构静力学分析是最基本但又是应用最为广泛的一类分析类型。线性分析包括两个方面的含义：首先是材料为线性，应力应变关系为线性，变形是可恢复的；其次，结构发生的是小位移、小应变、小转动，结构刚性不因变形而变化。

5.1.1　线性结构静力分析基础

结构静力学（Static Structural）用于计算在固定不变载荷作用下结构的效应，它不考虑惯性和阻尼的影响，如结构随时间变化载荷的情况。

静力分析方程为

$$[K]\{x\}=[F]$$

式中，$[K]$为刚度矩阵；$\{x\}$为位移矢量；$[F]$为静力载荷。假设材料为线弹性，结构小变形，则$[K]$为常量矩阵且必须是连续的，$[F]$为静态加载到模型上的力，该力不随时间变化，不包括惯性影响因素（质量、阻尼等）。

实际工程中，结构除了承受永久性载荷以外，还会受到动载荷的影响。当载荷变化缓慢时，变化周期远大于结构的自振周期，其动力响应很小，可作为静载荷处理；反之，则作为动载荷处理。

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Static Structural】上按住鼠标右键并拖动到项目管理区，即可创建静力分析项目，按照分析项目从上到下的顺序执行静力分析，如图 5-1 所示。

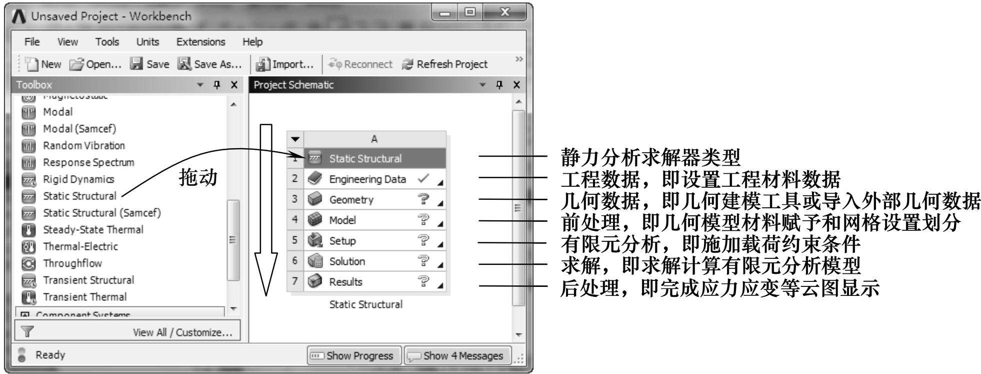


图 5-1　创建静力分析项目

5.1.2　工程数据和几何模型

静力结构分析的求解步骤如下：

1．工程数据

在线性结构静力学分析中，材料属性必须输入弹性模量和泊松比。如果施加了惯性载荷，必须输入材料的密度，如果施加了温度载荷，还必须输入材料的线膨胀系数。双击分析项目中的【Engineering Data】选项，进入如图 5-2 所示的材料参数设置界面，可输入或者从材料库中选择材料。

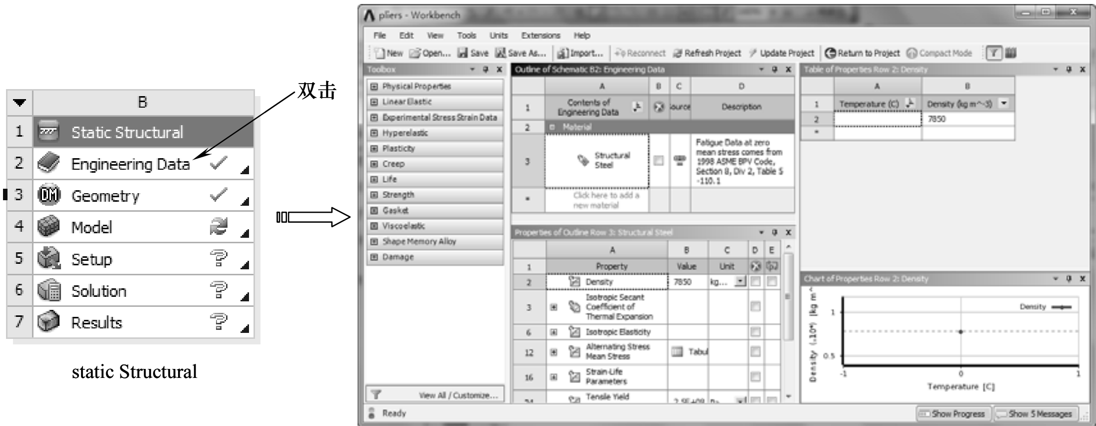


图 5-2　双击【Engineering Data】选项

2．几何模型

在 ANSYS Workbench 的静力结构分析中支持的几何模型类型包括实体、面体、线体和点质量 4 种。

✧　实体：实体中程序默认的单位为 10 节点的四面体单元及 20 节点的六面体单元。

✧ 面体：面体首先需要确定其厚度，然后采用 4 节点的四边形单元划分网格。

✧ 线体：首先在 DM 里定义线体的截面和方向，线体实际采用的是 2 节点单元划分网格，该单元支持截面定义及其偏置。

✧ 点质量：点质量只能与面体一起使用，并假设它们之间没有刚度。点质量是指在模型中添加一个质量点来模拟结构中没有明确建模的重量体。用户可在自定义的坐标系中指定（x、y、z）坐标值或通过选择顶点/边/面指定质量点的位置。

（1）体属性　选择几何模型下的体，可在【体】详细设置窗口中指定属性，如图 5-3 所示。

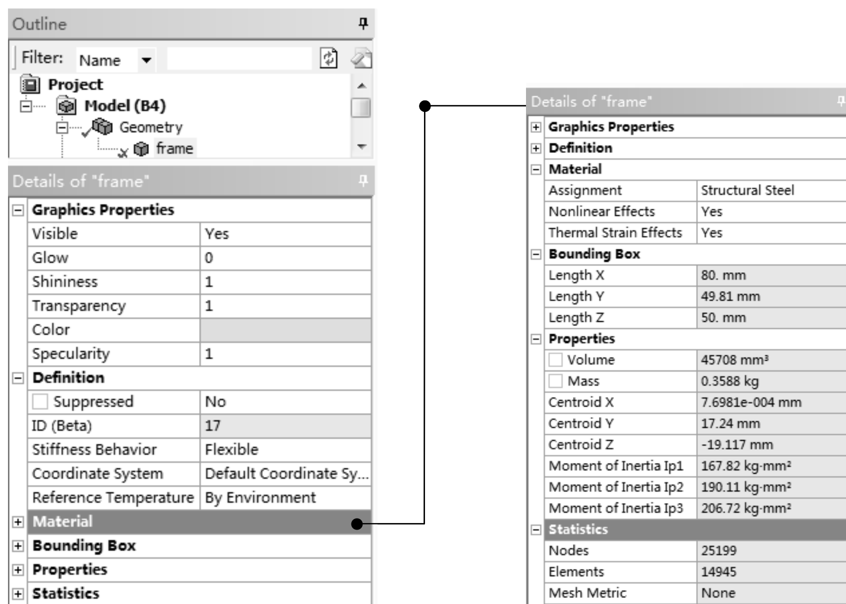


图 5-3　【体】详细设置窗口

✧ Graphics Properties（图形属性）：可视化（Visible）、透明度（Transparency）、颜色（Color）等。

✧ Definition（定义）：是否抑制体（Suppressed）、刚性行为（Stiffness Behavior）、坐标系（Coordinate System）、参考温度（Reference Temperature）。

注意：刚性行为为 Rigid，静力分析中仅考虑惯性载荷，可通过关节载荷施加到刚体上，刚体输出结果为零件的全部运动和传递力。如果为 Flexible，包括非线性行为，如大变形或超弹等，计算时间将显著增加，因此如果可能可采用简化模型将三维结构转变为二维平面应力、平面应变或轴对称模型进行分析。

✧ Material（材料）：对不同的体分配在工程数据中定义的材料（Assignment），指定是否包含非线性效应（Nonlinear Effects）及热应变效应（Thermal Strain Effects）。

✧ Bounding Box（边界盒）：指定模型的空间范围，给出 X、Y、Z 的长度。

✧ Properties（属性）：统计几何属性，包括体积、质量、质心、惯性矩等。

✧ Statistics（统计）：显示该对象网格模型的统计结果，包括节点数、单元数和网格质量。

（2）点质量　点质量用于模拟没有确切几何模型的质量。

在【Outline（分析树）】中选择【Geometry】节点，单击【Geometry】工具栏上的【Point Mass】按钮，在【Detail of“Point Mass”】列表中的【Geometry】表示点质量与实体模型的连接位置，在【X Coordinate】和【Y Coordinate】文本框中定义点质量模型的质心位置，在【Mass】中输入点质量大小，如图 5-4 所示。

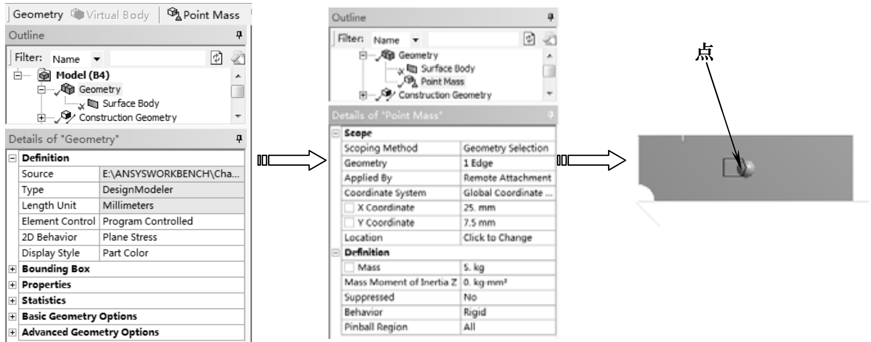


图 5-4　点质量

提示：点质量只受加速度、重力加速度和角加速度的影响，本身不存在转动特性。点质量的材料属性只需定义杨氏模量以及泊松比。

5.1.3　构造几何

构造几何（Construction Geometry）指定路径或者表面对象，用于将结果映射到路径或表面上。

（1）路径　使用路径可以在指定的空间曲线上获得需要的结果。使用路径的操作步骤如下：

✧ 创建路径。在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Construction Geometry】工具栏上的【Path】按钮 Path，单击【Point（选择点）】按钮，在详细设置窗口中单击【Start】选项下【Location】后的【Click to Change】项，再图形区选择一点作为起点，再单击【End】选项下【Location】后的【Click to Change】项，在图形区选择一点作为终点，如图 5-5 所示。

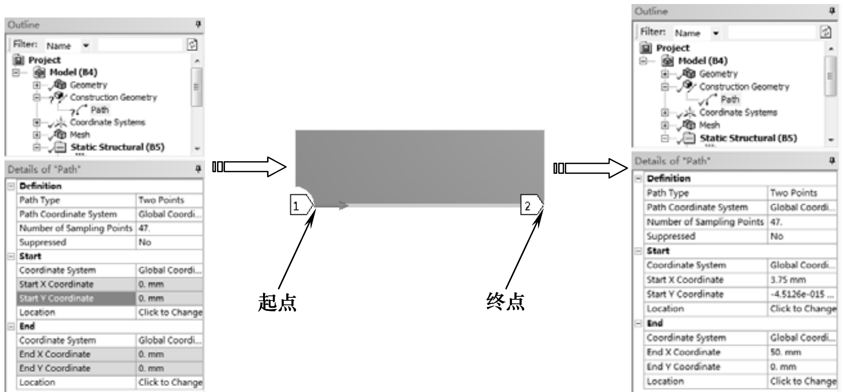


图 5-5　创建路径

✧ 映射路径。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，修改名称为【Path Equivalent Stress】，在详细设置窗口中选择【Scoping Method】为 Path，选择【Path】为 Path，如图 5-6 所示。

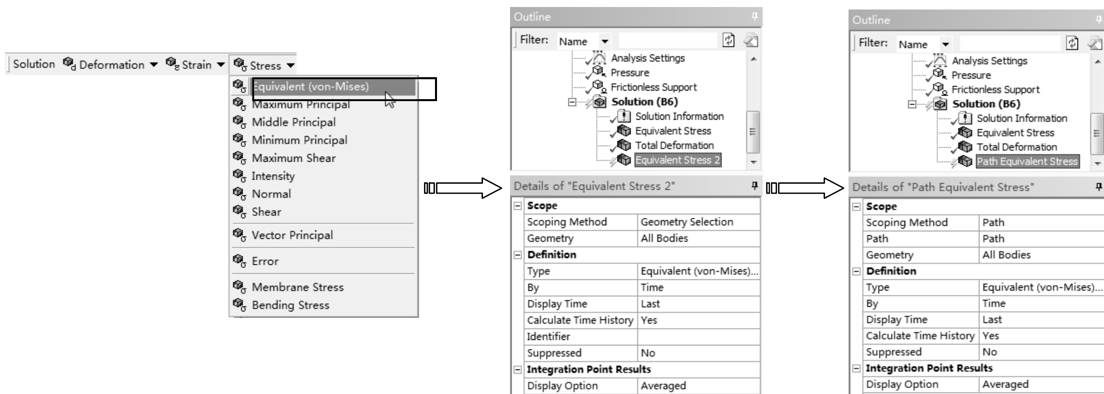


图 5-6　映射应力到路径

✧ 显示路径结果。在【Outline（分析树）】中选择【Path Equivalent Stress】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单选择【Evaluate All Results】命令，在图形窗口显示路径上的应力分布，如图 5-7 所示。

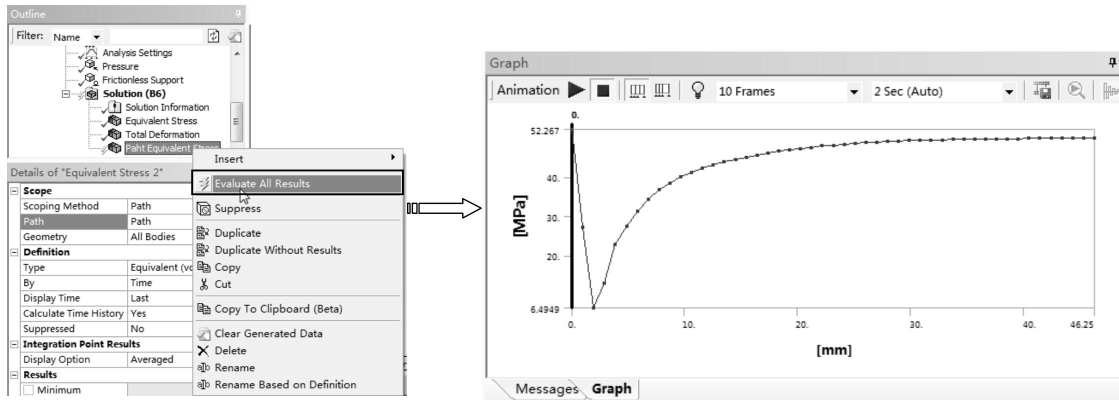


图 5-7　显示路径上的应力

（2）表面　以表面形式构造几何，显示切平面的结果。创建步骤如下：

✧ 在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Model】工具栏上的【Construction Geometry】按钮。

✧ 在【构造几何】工具栏上单击【Surface】按钮，插入表面。

✧ 定义坐标系，该坐标系的 *XY* 平面用于切平面。

5.1.4　分析设置

结构静力学分析中对简单线性行为无须设置，对复杂分析则需要设置一些控制选项，包

括“Step Controls（步长控制）”“Solver Controls（求解控制）”“Restart Controls（重启动控制）”“Nonlinear Controls（非线性控制）”“Output Controls（输出控制）”“Analysis Data Management（分析数据管理）”等。

（1）步长控制（Step Controls） 步长控制（Step Controls）用于指定求解步数和时间。在非线性分析时，用于控制时间步长，步长控制也用于创建多载荷步，如螺栓预紧载荷，如图 5-8 所示。

Details of "Analysis Settings"

Step Controls		
Number Of Steps	1.	载荷步数：1（默认）
Current Step Number	1.	当前载荷步：1（默认）
Step End Time	1. s	载荷步结束时间：1s（默认）
Auto Time Stepping	Program Controlled	自动时间步长：程序控制（默认）

图 5-8 步长控制（Step Controls）

（2）求解控制（Solver Controls） 求解控制（Solver Controls）用于选择求解器类型，如图 5-9 所示。

Solver Controls		
Solver Type	Program Controlled	求解器：程序控制/直接法/迭代法
Weak Springs	Program Controlled	弱弹簧：程序控制/开/关
Large Deflection	Off	大变形开关：关（默认）/开
Inertia Relief	Off	惯性释放：关（默认）/开

图 5-9 求解控制（Solver Controls）

- ✧ Solver Type：求解器控制有两种类型，可设置“程序控制”来自动选取。“Direct（直接求解器）”用于薄面和细长体的模型，它是一个很有力的求解器并且可以处理任何情况；“Iterative（迭代求解器）”在处理体积大的模型时很有效。
- ✧ Weak Springs：稳定模型可施加弱弹簧，默认由程序控制，分析系统将预测受约束的模型。在某些情况下，希望模型是在平衡状态下而不是约束所有可能的刚性模型。弱弹簧可通过阻止奇异矩阵来实现帮助，然而约束所有可能的刚体运动是很好的习惯。
- ✧ Large Deflection：对于典型的细长结构，当横向位移超过长度的 10%时，应设置大变形选项。

（3）Restart Controls（重启动控制） Restart Controls（重启动控制）用于设置静力分析中的多个重启动点，用于后续的预应力模态分析及线性屈曲分析，如图 5-10 所示。

Restart Controls		
Generate Restart Points	Program Controlled	生成重启动点：程序控制（默认）
Retain Files After Full Solve	No	完全求解后保留文件：否（默认）

图 5-10 Restart Controls（重启动控制）

（4）Nonlinear Controls（非线性控制） Nonlinear Controls（非线性控制）可以修改收敛准则和其他一些求解控制选项，增加了稳定性控制和稳定能量结果，如图 5-11 所示。

Nonlinear Controls		
Force Convergence	Program Controlled	力收敛准则：程序控制（默认）
Moment Convergence	Program Controlled	力矩收敛准则：程序控制（默认）
Displacement Convergence	Program Controlled	位移收敛准则：程序控制（默认）
Rotation Convergence	Program Controlled	转角收敛准则：程序控制（默认）
Line Search	Program Controlled	线性搜索：程序控制（默认）
Stabilization	Off	稳定性：关（默认）

图 5-11　Nonlinear Controls（非线性控制）

（5）Output Controls（输出控制）　Output Controls（输出控制）允许在结果后处理中得到需要的时间点结果，尤其在非线性分析中，中间载荷的结果是很重要的，如图 5-12 所示。

Output Controls		
Stress	Yes	是否得到应力计算结果：是（默认）
Strain	Yes	是否得到应变计算结果：是（默认）
Nodal Forces	No	是否得到节点力计算结果：否（默认）
Contact Miscellaneous	No	计算接触：否（默认）
General Miscellaneous	No	通用计算：否（默认）
Store Results At	All Time Points	保存结果在：所有时间点（默认）
Max Number of Result Sets	Program Controlled	最大结果集数量：程序控制（默认）

图 5-12　Output Controls（输出控制）

（6）Analysis Data Management（分析数据管理）　Analysis Data Management（分析数据管理）用于管理分析数据的储存结果文件以用于其他的分析系统，如图 5-13 所示。如离心力载荷作用下涡轮叶片承受很大的拉应力，叶片刚度增加，自然频率增加，因此设置【Future Analysis】为“Pre-Stressed Analysis”，可将静力分析结果用于后面的模态分析。

Analysis Data Management		
Solver Files Directory	E:\写书文件夹\《A...	求解文件路径
Future Analysis	None	后续分析类型：无（默认）
Scratch Solver Files Direct...		求解临时文件夹
Save MAPDL db	No	是否保存MAPDL db文件：否（默认）
Delete Unneeded Files	Yes	是否删除不需要文件：是（默认）
Nonlinear Solution	No	是否非线性求解：否（默认）
Solver Units	Active System	求解器单位：当前活动系统（默认）
Solver Unit System	nmm	求解器单位系统：nmm

图 5-13　Analysis Data Management（分析数据管理）

5.1.5　载荷和约束

载荷和约束是有限元分析计算的边界条件，Mechanical 中有 4 种类型的载荷：惯性载荷、结构载荷、结构约束和热载荷，见表 5-1。

- ✧ 惯性载荷：包括加速度和旋转速度。惯性载荷施加在整个模型上，因为要进行惯性力计算，所以必须输入材料的密度。
- ✧ 结构载荷：也称为集中力和压力，指施加在系统部件上的力或力矩。
- ✧ 结构约束：限制结构的一个或多个自由度，使结构的移动限制在一定范围内。
- ✧ 热载荷：也称为温度载荷，热载荷会产生一个温度场，使模型中发生热膨胀或热传导。

表 5-1　结构分析中的载荷和约束

载荷类型	命　令	说　明	载荷类型	命　令	说　明
惯性载荷	Acceleration	加速度	结构约束	Fixed Support	固定约束
	Standard Earth Gravity	重力加速度		Displacement	位移约束
	Rotational Velocity	角速度		Remote Displacement	远端位移
结构载荷	Pressure	压力		Velocity	速度
	Hydrostatic Pressure	静水压力		Frictionless Support	无摩擦支撑
	Force	力		Cylindrical Support	圆柱面支撑
	Remote Force	远端力		Elastic Support	弹性支撑
	Bearing Load	轴承载荷			
	Bolt Pretension	螺栓预紧载荷			
	Moment	力矩			
	Line Pressure	线压力			
热载荷	Thermal Condition	热条件			

在 ANSYS Workbench 中载荷和约束施加方法有两种：Components（分量方式）和 Vector（矢量方式）。

✧ Components（分量方式）：按分量形式定义时需要输入结构载荷 *X*、*Y*、*Z* 方向分量的数值，由 3 个分量确定载荷的大小和方向，如图 5-14 所示。定义数值时可采用全局坐标系或用户自己创建的坐标系。

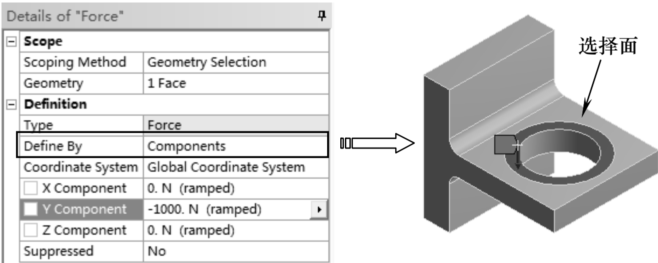


图 5-14　分量方式

✧ Vector（矢量方式）：按矢量定义时，要先选择几何体，施加载荷的方向由几何体决定，大小在【Magnitude】框中输入，选择【Direction】项后的【Click to Change】选项，将在图形窗口显示按钮，单击可改变矢量的方向，如图 5-15 所示。

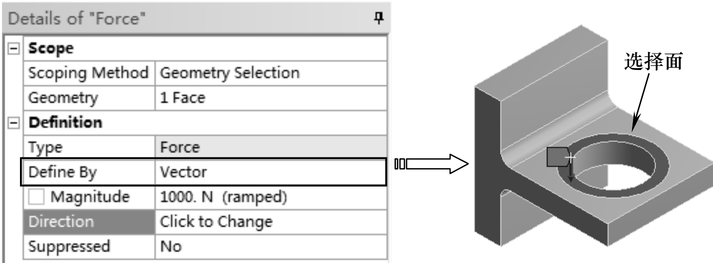


图 5-15　矢量方式

提示：选择几何体为平面时，载荷矢量方向垂直于平面；几何体为圆柱面时，载荷矢量沿圆柱面的轴线方向；几何体为直边时，载荷矢量沿直边方向；几何体为圆柱面边缘时，载荷矢量垂直于圆柱面边缘；选择两个角点时，载荷矢量沿两点连线方向。

（1）惯性载荷

✧ Acceleration（加速度）：加速度以长度比上时间的平方为单位作用在整个模型上。由于加速度施加到系统上，惯性将阻止速度所产生的变化，因此惯性力的方向与所施加的加速度方向相反。加速度可通过定义分量或矢量进行施加，如图 5-16 所示。

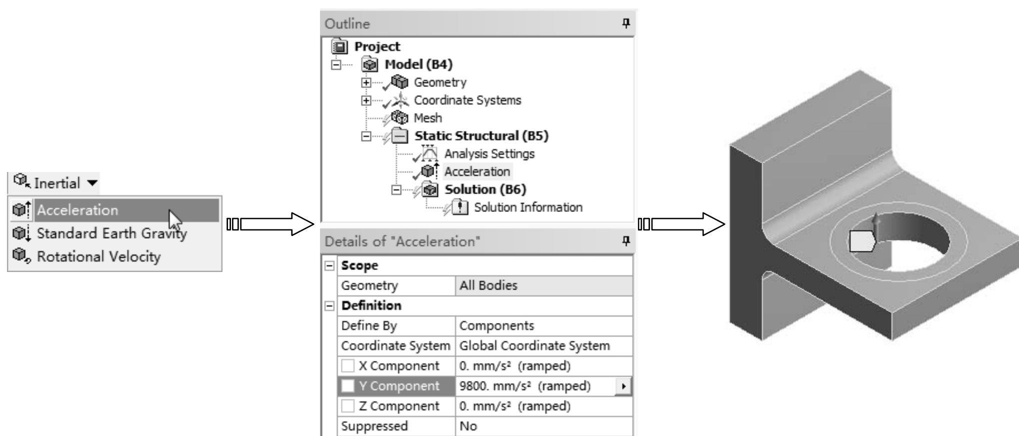


图 5-16　加速度

✧ Standard Earth Gravity（重力加速度）：重力加速度作为一个特殊的加速度载荷存在，其大小为 9.80665m/s^2。重力加速度方向总是沿着总体坐标系的某一个轴，不需要定义与其相反的方向得到重力作用力，如图 5-17 所示。

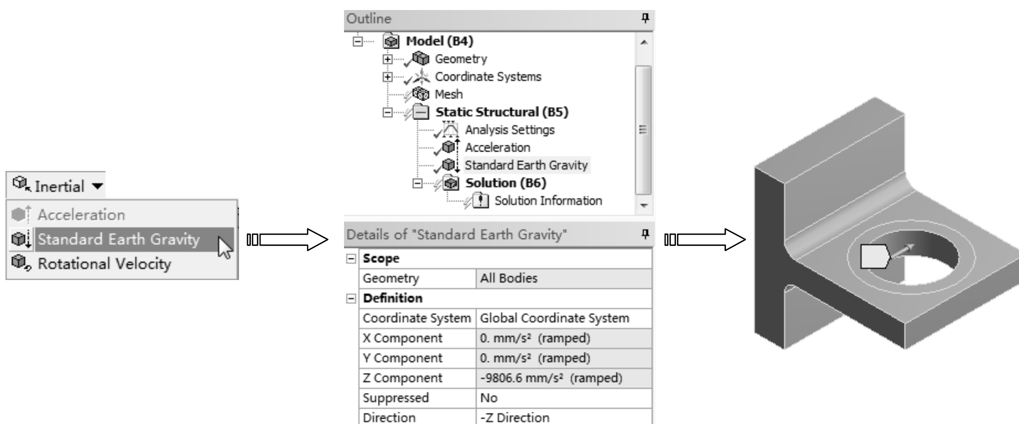


图 5-17　重力加速度

✧ Rotational Velocity（角速度）：角速度作为一个可实现的惯性载荷，用于定义整个模型围绕一根轴在给定的速度下旋转，也可以通过分量来定义角速度，如图 5-18 所示。

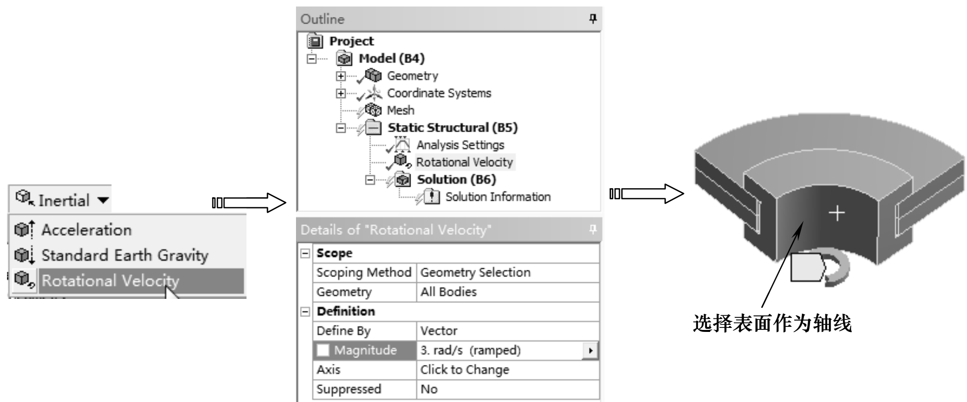


图 5-18　角速度

提示：由于模型围绕轴旋转，因此需要选择轴线，默认转速需要输入每秒转过的弧度，可通过【Units】下拉菜单中的【RPM】命令设置为每分钟转速。

（2）结构载荷

- ✧ Pressure（压力）：压力只能施加在面上且通常与表面的法向一致，指向面内为正（例如压缩），负值代表从表面出来（例如抽气），如图 5-19 所示。压力也可以按分量形式施加，压力的单位为单位面积上的力。

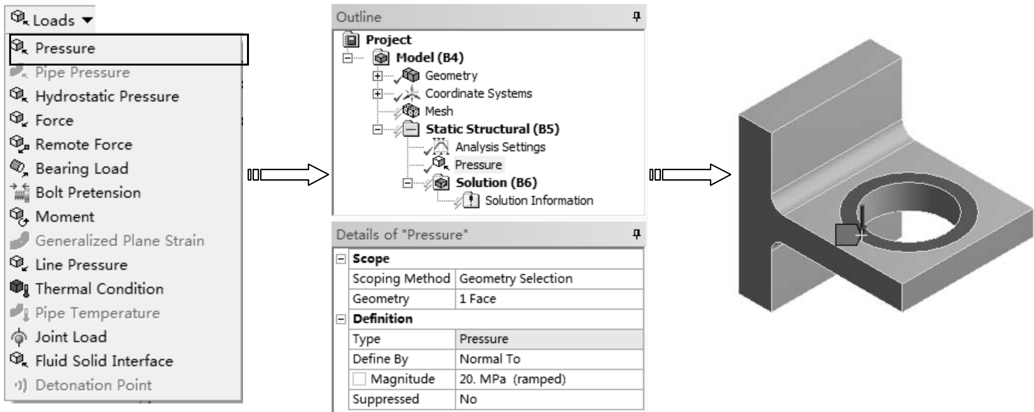


图 5-19　压力

- ✧ Hydrostatic Pressure（静水压力）：静水压力是指施加在面上的沿坐标轴方向变化的压力，用于模拟流体对容器的压力作用。施加静水压力时，需要指定流体密度、静水加速度（注意方向与实际方向相反）和流体液面位置，如图 5-20 所示。
- ✧ Force（力）：力可施加在结构的点、边或面上，如图 5-21 所示。施加到面上的力将均匀分布到所选对象上，如一个力施加到两个相同的表面上，每个表面将承受这个力的一半。力可通过定义矢量、大小以及分量来施加。
- ✧ Remote Force（远端力）：远端力是指在几何体的点、边、面上施加一个远离的集中力载荷，相当于施加一个同样大小的集中力和一个因为力偏置产生的力矩，该载荷需要指定力作用点的位置，如图 5-22 所示。

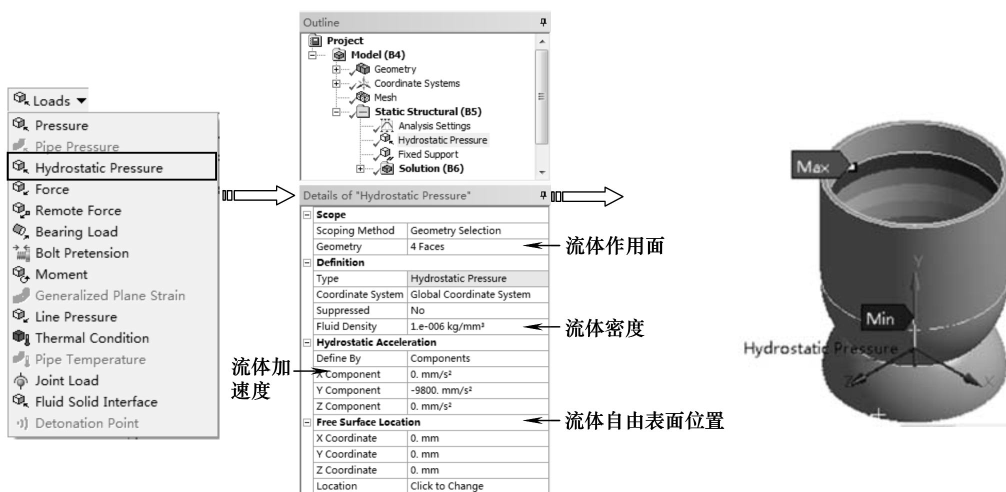


图 5-20　静水压力

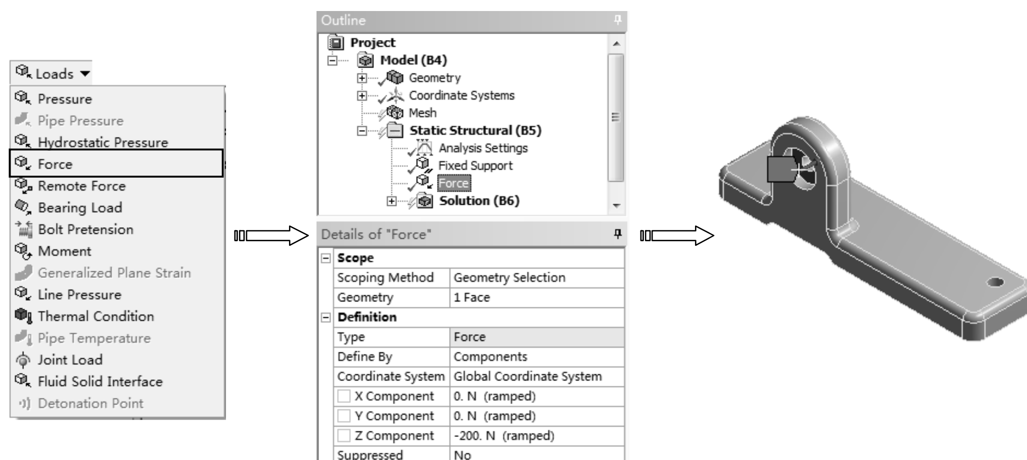


图 5-21　力

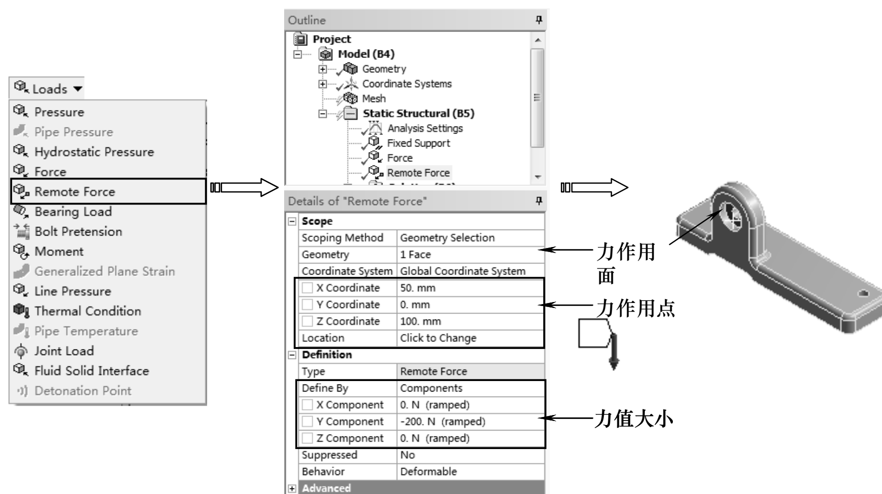


图 5-22　远端力

✧ Bearing Load（轴承载荷）：轴承载荷仅适用于施加在圆柱表面上，其径向分量将根据投影面积来分布压力载荷，周向分量沿圆周均匀分布，无轴向分量，如图 5-23 所示。一个圆柱表面只能施加一个轴承载荷，如果一个圆柱表面切分为两个部分，那么在施加轴承载荷的时候一定要保证这两个柱面都被选中。轴承载荷可通过矢量和大小或者分量来定义。

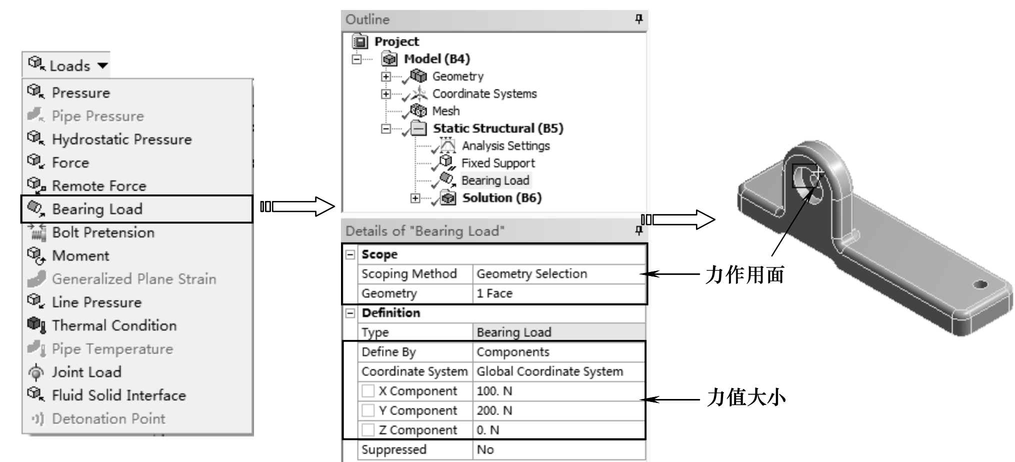


图 5-23　轴承载荷

✧ Bolt Pretension（螺栓预紧载荷）：螺栓预紧载荷可在圆柱面、线体的边、单个体或多个体上施加预紧载荷以模拟螺栓连接，如图 5-24 所示。如果在一个体上施加螺栓预紧载荷，则需要指定一个已定义好的坐标系，预紧载荷作用在该坐标系的原点且方向与坐标系的 *Z* 轴方向一致，所选择的坐标系可以是全局坐标系或自定义的局部坐标系。

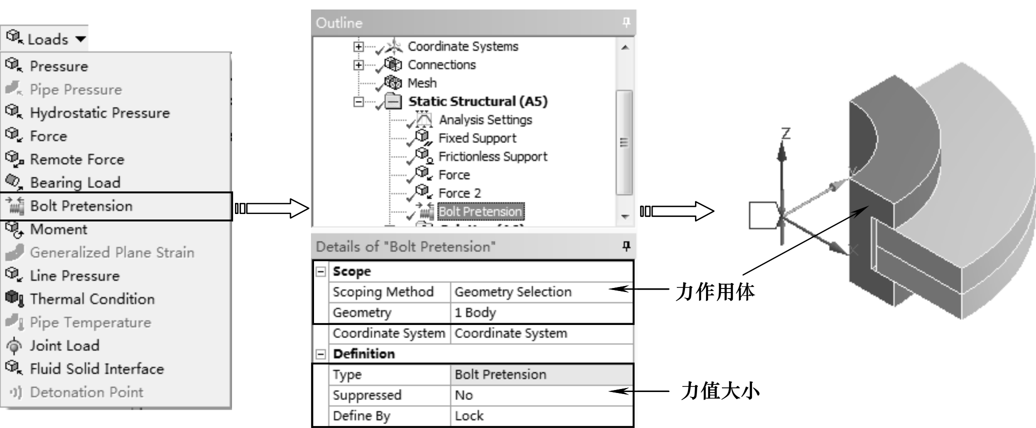


图 5-24　螺栓预紧载荷

✧ Moment（力矩）：力矩可在点、线或面上施加力矩，如图 5-25 所示。对于实体，力矩可以施加在任意表面，假如选择了多个表面，那么力矩将分摊在这些表面上。力

矩可以用矢量及其大小或者分量来定义，当用矢量表示时，其遵守右手法则。在实体表面，力矩也可以施加在顶点或边缘，这与通过矢量或分量定义的以表面为基础的力矩类似。

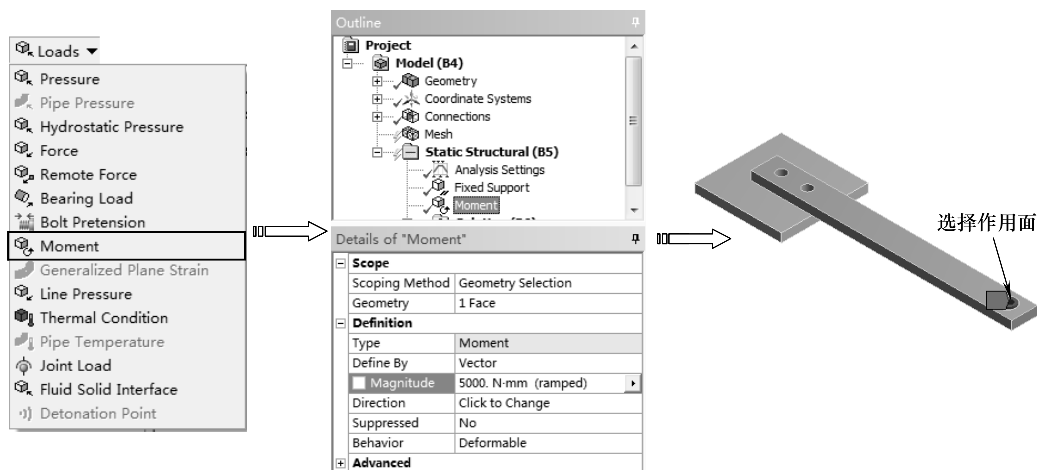


图 5-25　力矩

✧ Line Pressure（线压力）：线压力只用于三维分析中，它以载荷密度的形式在边上施加一个分布载荷，单位为力/长度，大小和方向的定义可以按照矢量、分量及切向，也可以定义时间和空间的分布载荷，如图 5-26 所示。

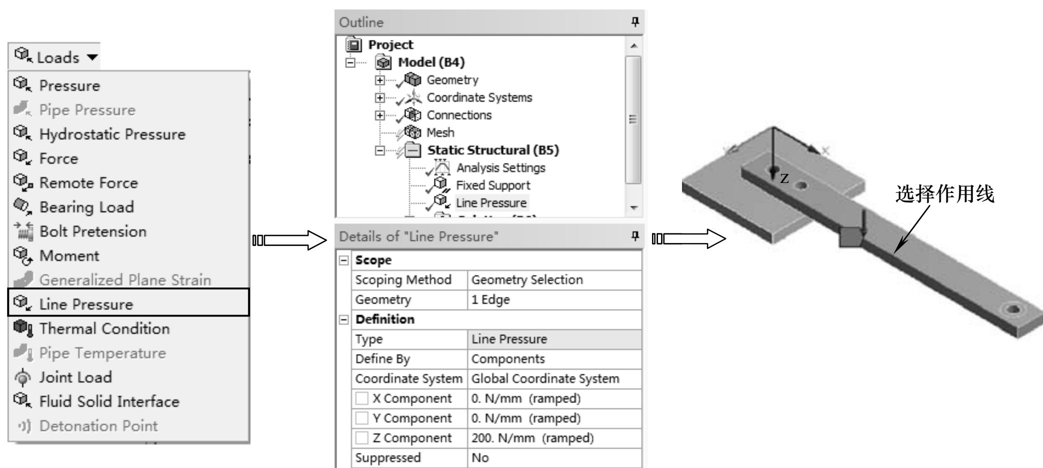


图 5-26　线压力

✧ Thermal Condition（热条件）　热条件可在结构分析和热分析中插入已知的温度边界条件，如图 5-27 所示。结构分析中指定热膨胀系数并施加温度载荷后计算热应变，热应变本身不会引起应力，但当约束、温度梯度或热膨胀系数不相匹配时会产生应力。

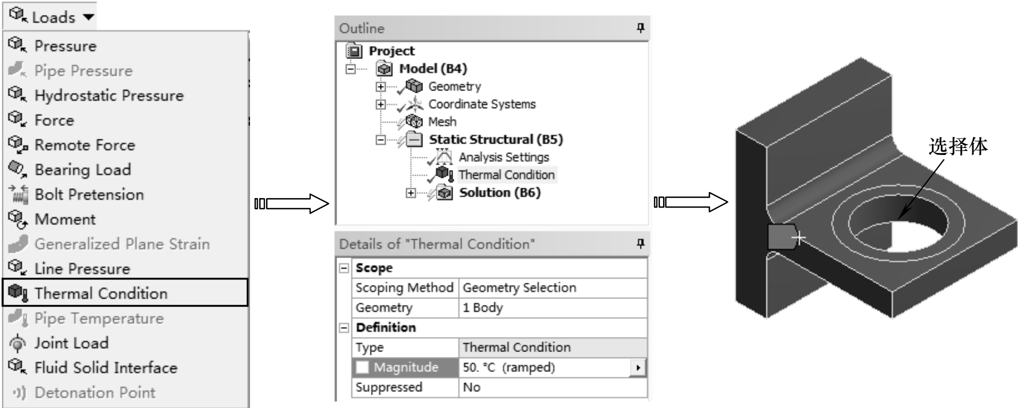


图 5-27　热条件

（3）结构约束

✧ Fixed Support（固定约束）：固定约束约束点、线、面的所有自由度为零，如图 5-28 所示。对于实体限制 *X*、*Y* 和 *Z* 方向上的移动；对于面体和线体限制 *X*、*Y* 和 *Z* 方向上的移动和绕各轴的转动。

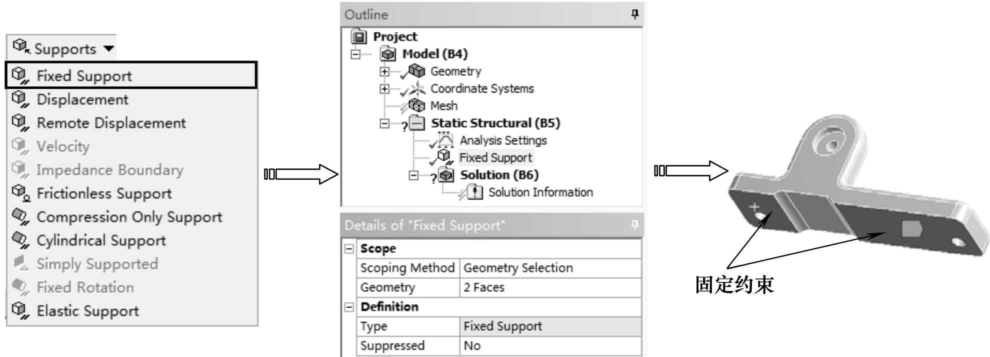


图 5-28　固定约束

✧ Displacement（位移）：位移约束是在选择的点、线、面上施加已知线性位移，输入 0 代表此方向上已被约束，不设定某个方向的值意味着实体在这个方向上自由运动，如图 5-29 所示。



图 5-29　位移约束

✧ Remote Displacement（远端位移）：远端位移用于在远端加载平动和旋转位移，如图 5-30 所示。需要通过点或输入坐标值定义远端的定位点，默认位置为几何模型的质心，可用局部坐标系或整体坐标系，通过局部坐标系来施加转角。

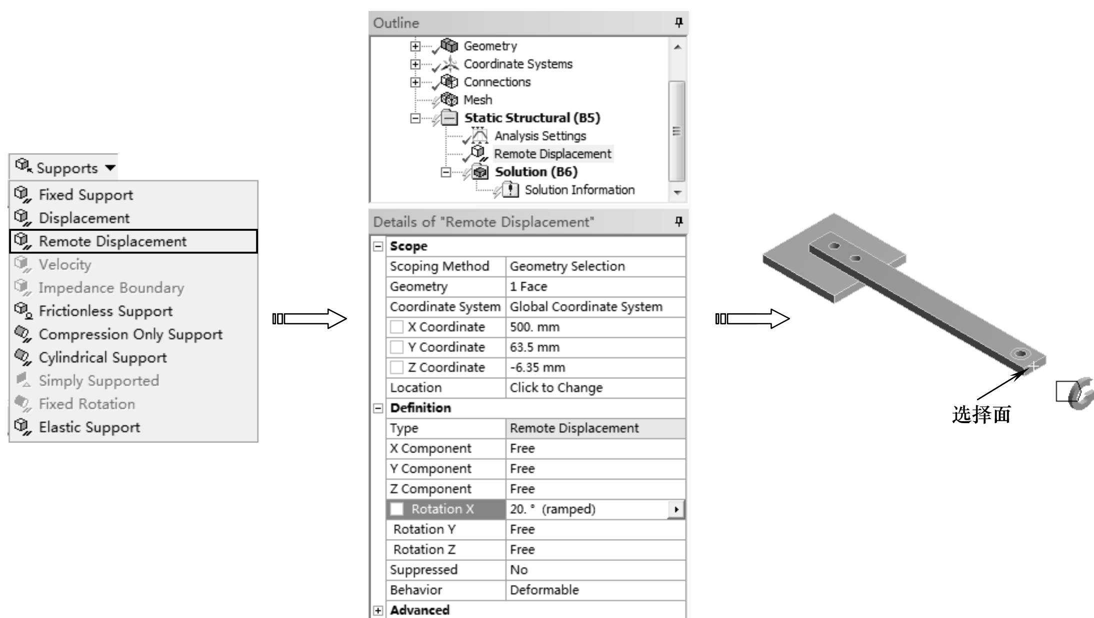


图 5-30　远端位移

✧ Frictionless Support（无摩擦约束）：无摩擦约束是在几何体表面上施加法向约束，如图 5-31 所示。对于实体，这个约束可用于施加一个对称边界条件来实现，因为对称面等同于法向约束。

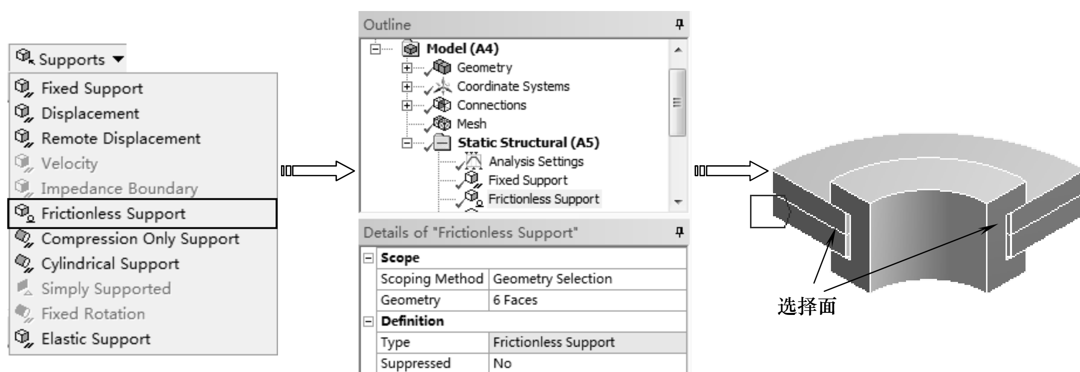


图 5-31　无摩擦约束

✧ Cylindrical Support（圆柱面支撑）：圆柱面约束是指施加在圆柱表面上的轴向、径向或者切向（圆周方向）约束，如图 5-32 所示。该约束仅适用于小变形（线性）分析。

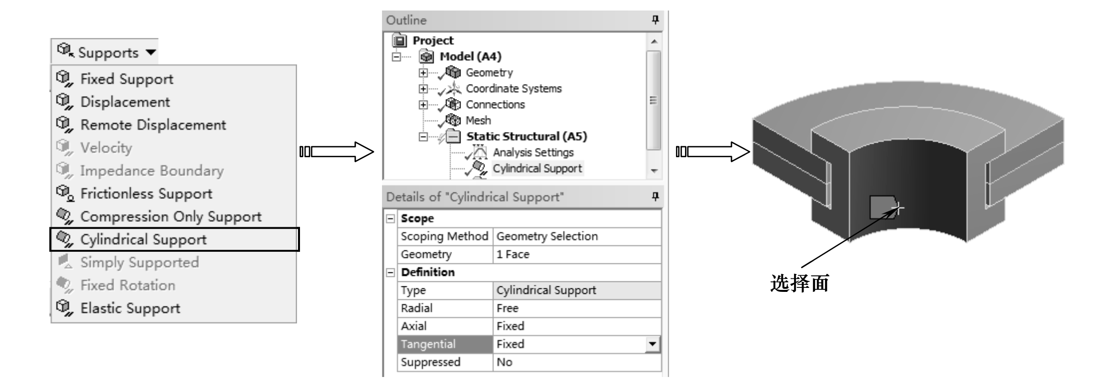


图 5-32　圆柱面约束

✧ Elastic Support（弹性支撑）：弹性支撑允许面或边根据弹簧形位产生移动或形变，弹性支撑基于定义的基础刚度【Foundation Stiffness】，以及产生基础单位法向变形的压力值来定义，如图 5-33 所示。

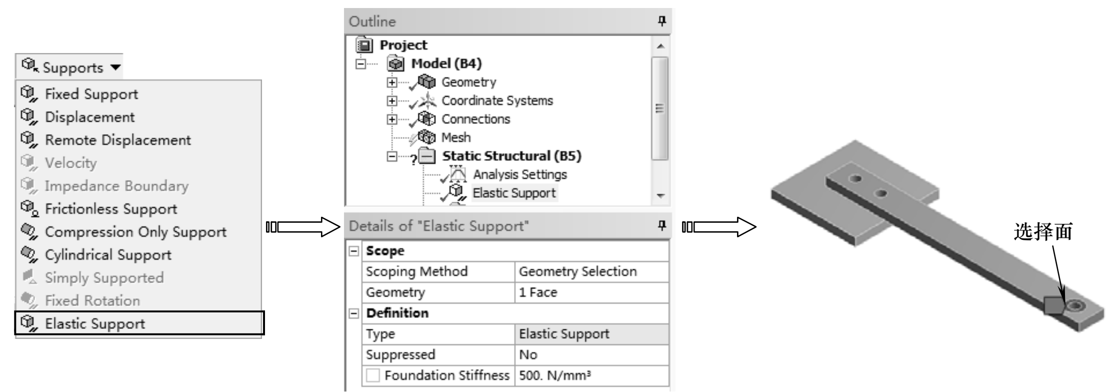


图 5-33　弹性支撑

5.2　实例 1——薄板平面受力结构分析

5.2.1　实例说明

如图 5-34 所示带孔板，厚度为 2mm，左边固定，右边受载荷 50MPa 拉力作用。材料为钢，求其变形和应力分布。

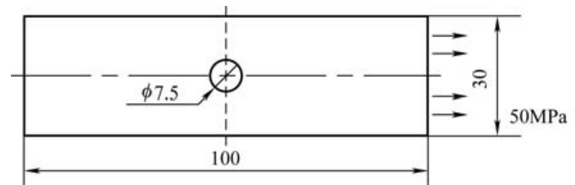


图 5-34　薄板模型

5.2.2　分析思路

本例是一个工程常见的平面问题，平面问题可分为平面应力问题和平面应变问题，利用 ANSYS Workbench 可进行平面分析，需要在 DesignModeler 中创建或打开一个面体，或者从任何可以创建面物体的 CAD 系统中导入，要求模型必须在 *XY* 平面内。

✧ 平面应力（Plane Stress，系统默认）：假设在 *Z* 方向上应力为 0，但是应变不为 0。这对于 *Z* 方向上尺寸远远小于 *X*，*Y* 两个方向尺寸的结构是合适的。如受到面内载荷的平板，或在压力或径向载荷下的圆盘。如果想输入这种模型的厚度，可以在 thickness 域中输入。

✧ 平面应变（Plain Strain）：假设 *Z* 方向上没有应变这对于 *Z* 方向上尺寸远大于 *X*，*Y* 尺寸的结构是合适的。*Z* 方向的应力不为 0。平面应变行为在热分析或形状优化分析中不可用。

本例为平面应力问题，模型结构对称，可简化为 1/4，通过设置 thickness 来指定厚度 2mm，在对称边界上施加无滑动摩擦约束构建对称条件。

5.2.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 5-35 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 5-36 所示。

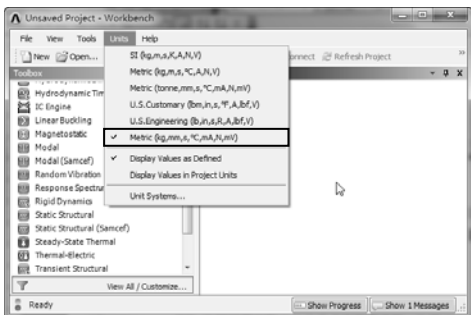


图 5-35　设置分析单位

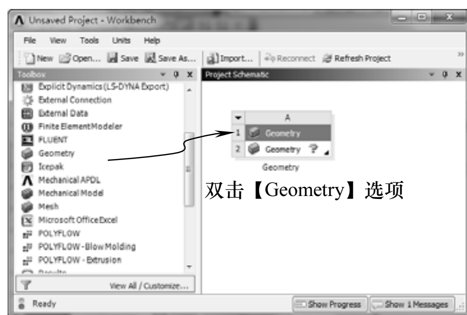


图 5-36　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structure】选项上按住鼠标左键拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 5-37 所示。

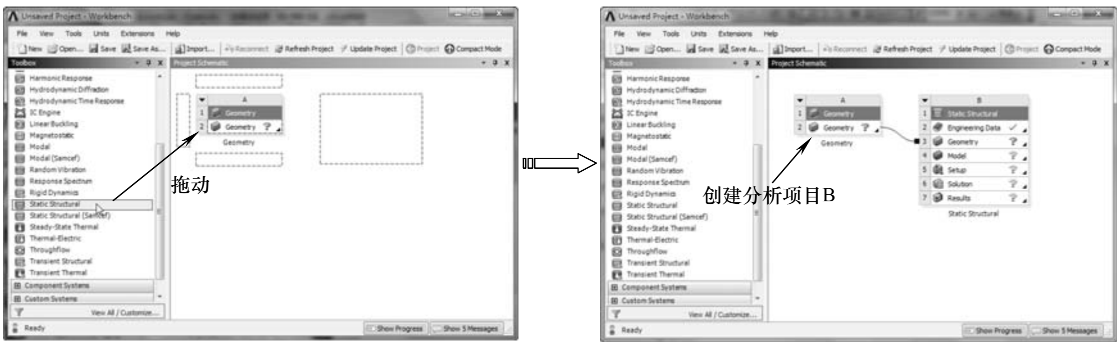


图 5-37　创建分析项目 B

2．建立几何体模型

1）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 5-38 所示。

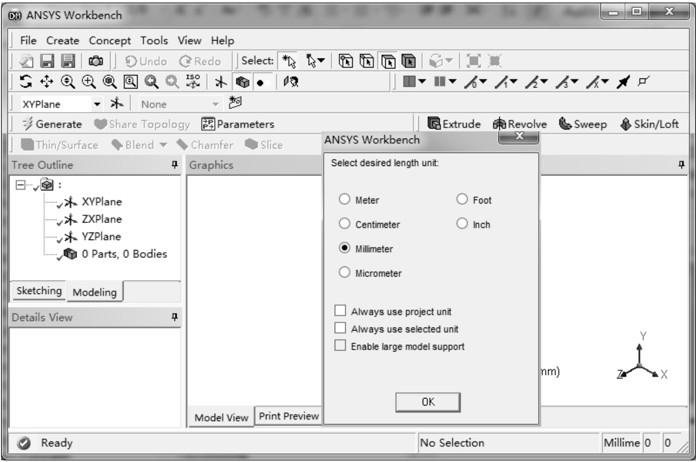


图 5-38 【ANSYS Workbench】对话框

2）在【Tree Outline（特征树）】中选择 XYPlane 平面，然后单击【Sketching】选项卡进入草绘状态。单击【图形显示控制】工具栏上的【Look at Face/Plane/ Sketch】按钮可立即改变视图方向，使草图平面与视线垂直。

3）单击【Draw】（草绘工具箱）中的【圆】、【直线】命令以及【Modify】（编辑工具箱）中的【修剪】命令，【Dimensions】（尺寸标注工具箱）中的【尺寸标注】命令，绘制如图 5-39 所示的草图。

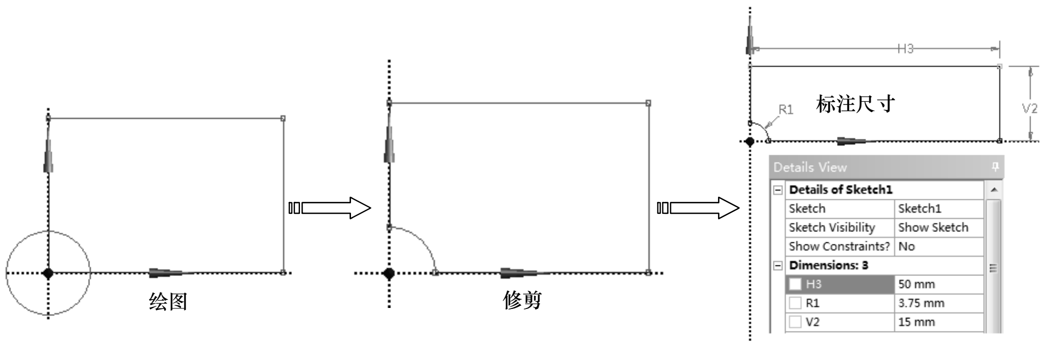


图 5-39　绘制草图

4）选择【Concept】|【Surfaces From Sketches】命令，选择上一步创建的草图，在详细设置窗口中单击【Base Objects】选项后的【Apply】按钮确定，然后单击【Generate】按钮，

系统自动生成面体，如图 5-40 所示。

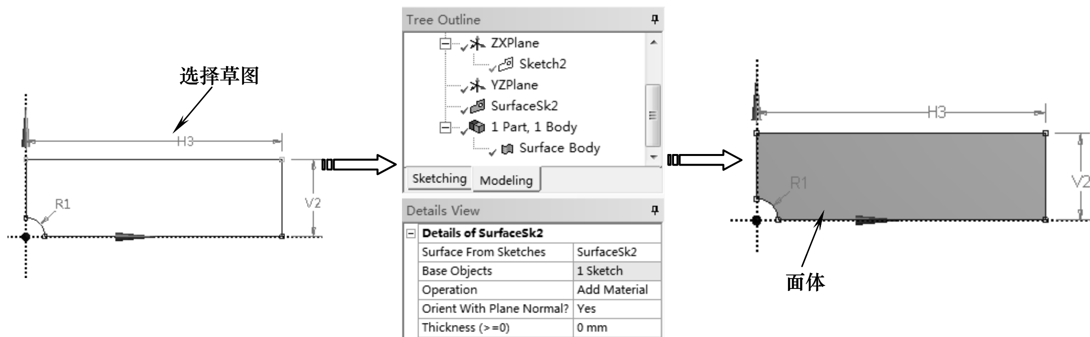


图 5-40　从草图生成面体

5）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 X 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Properties】命令，弹出【Properties of Schematic A2：Geometry】窗口，在【Analysis Type】下拉列表中选择 2D 分析类型，如图 5-41 所示。

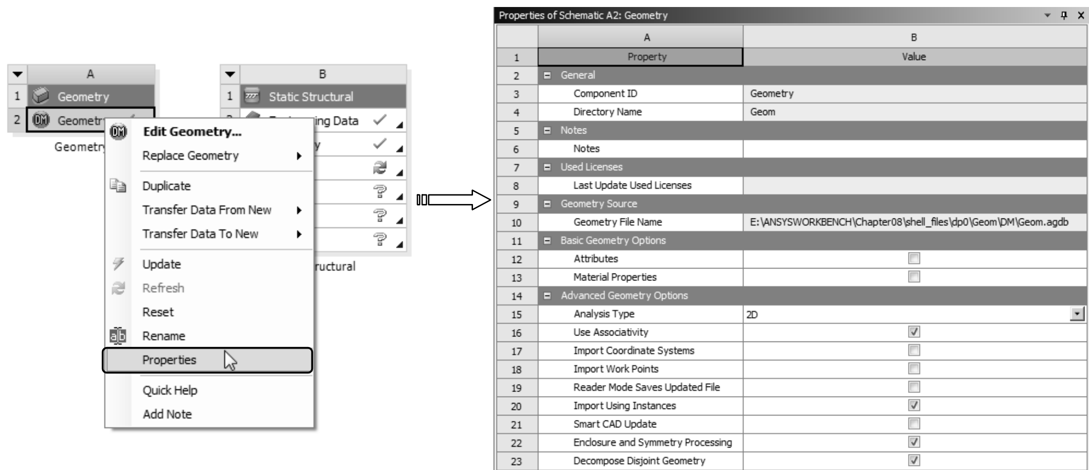


图 5-41　设置 2D 分析类型

7）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 5-42 所示。

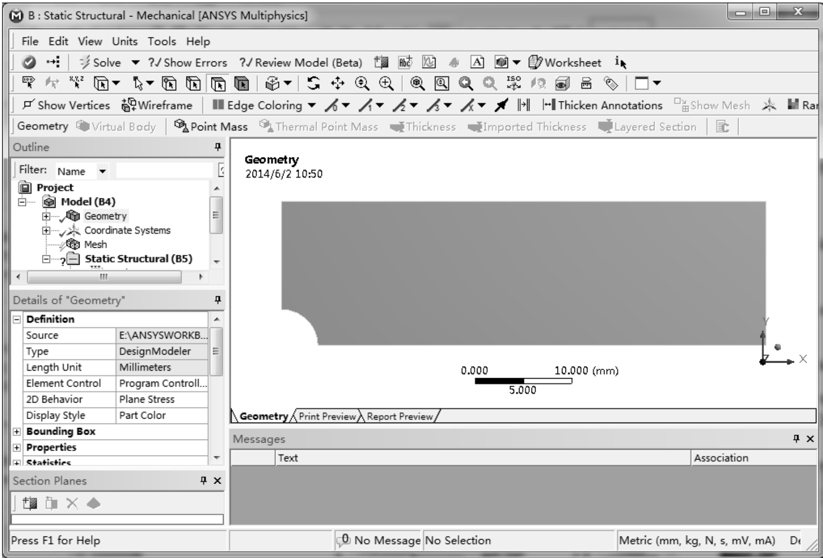


图 5-42　Mechanical 界面

2）在【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点，在【Details of “Geometry”】窗口中的【2D Behavior】下拉列表中选择 Plane Stress，如图 5-43 所示。然后选择【Geometry】下的【Surface Body】节点，在详细设置窗口中设置【Thickness】为 2mm（板厚为 2mm），如图 5-44 所示。

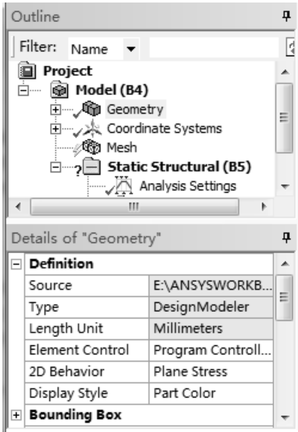


图 5-43　选择平面应力

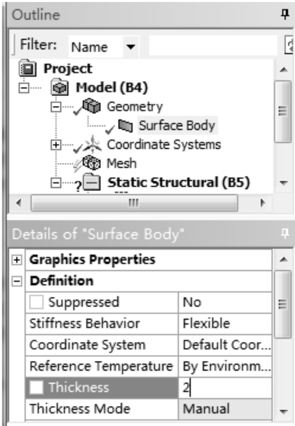


图 5-44　设置薄板厚度

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在图形区选择所创建的面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Element Size】文本框中输入 2mm，如图 5-45 所示。

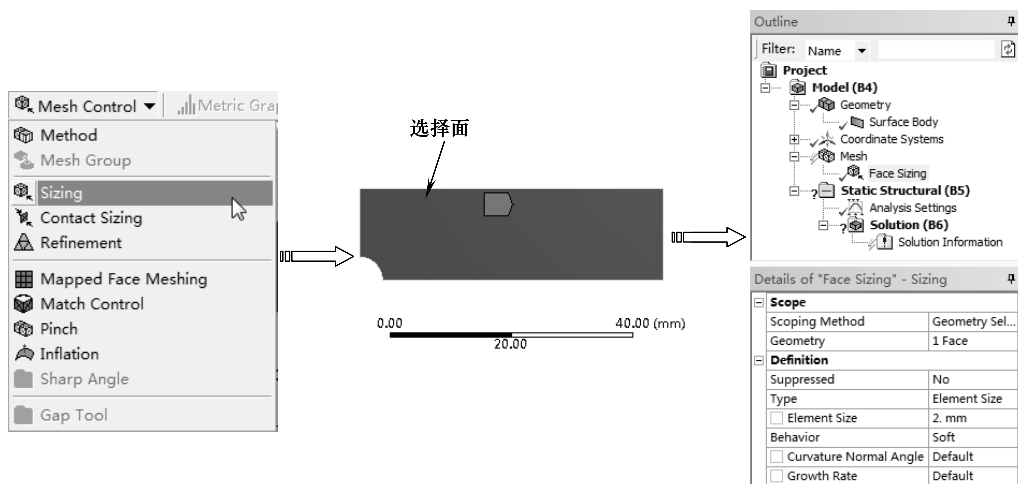


图 5-45　设置网格尺寸

4）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 5-46 所示。

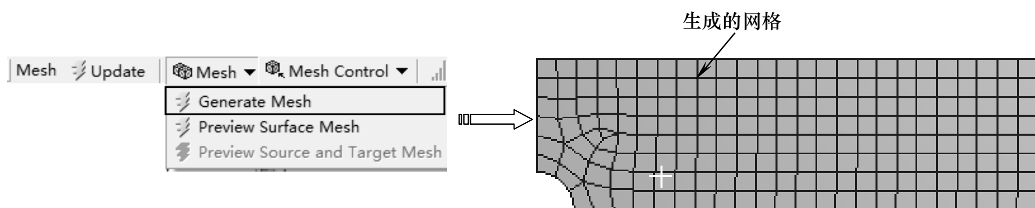


图 5-46　生成网格

6. 施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Line Pressure】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Edge（选择边）】按钮，在【Details of “Pressure”】窗口中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 5-47 所示边。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【X Component】文本框中输入 50MPa，如图 5-47 所示。

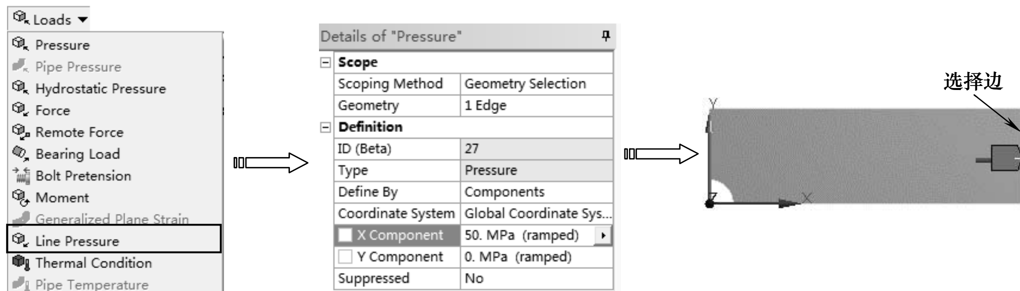


图 5-47　施加压力

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Frictionless Support】命令，单击【图形】

工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后单击【Edge（选择边）】按钮，在【Details of “Frictionless Support”】窗口中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 5-48 所示两条边。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 5-48 所示。

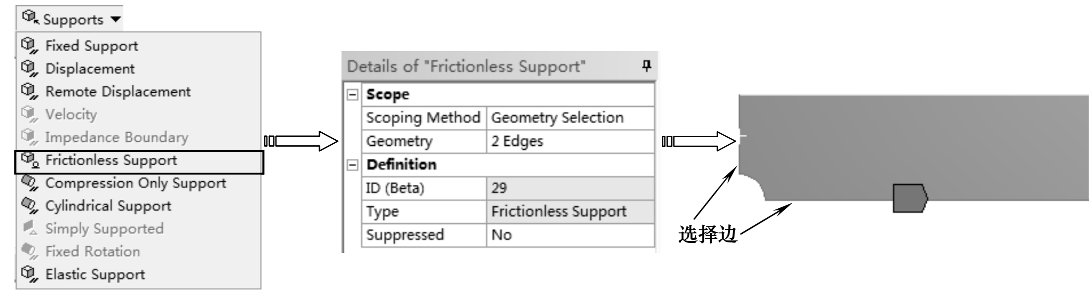


图 5-48　施加无摩擦约束

7. 设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 5-49 所示。

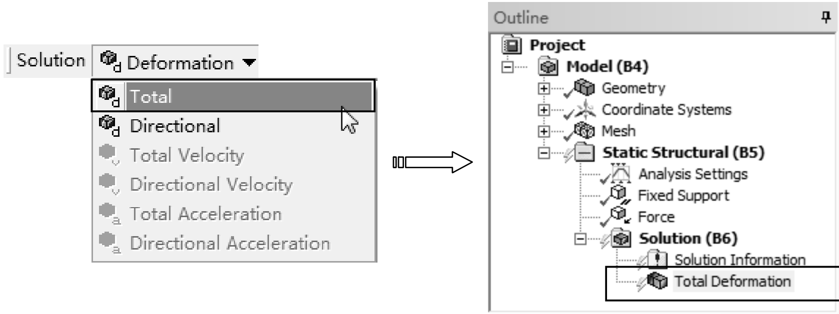


图 5-49　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 5-50 所示。

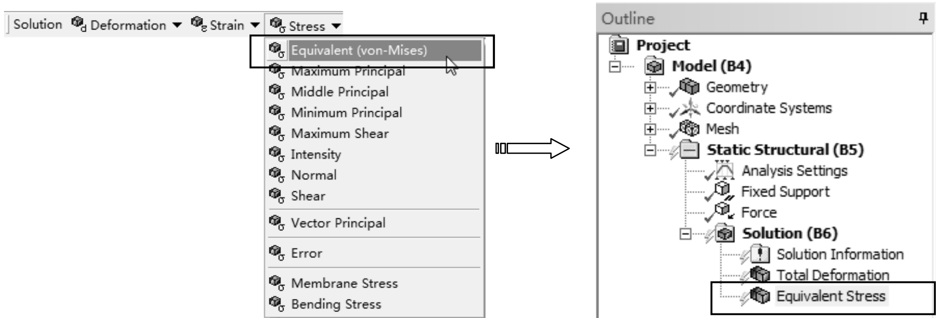


图 5-50　添加应力求解项

8. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求

解。求解完成后进度条自动消失，如图 5-51 所示。

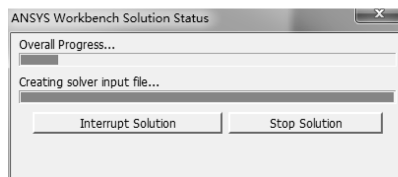


图 5-51　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 5-52 所示。

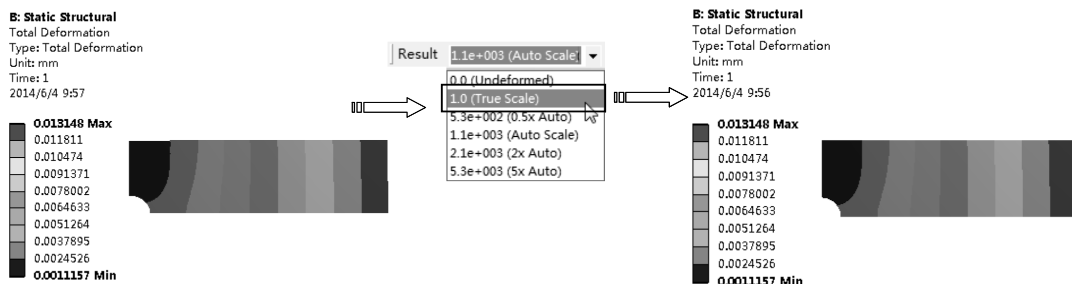


图 5-52　变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stressn】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 5-53 所示。

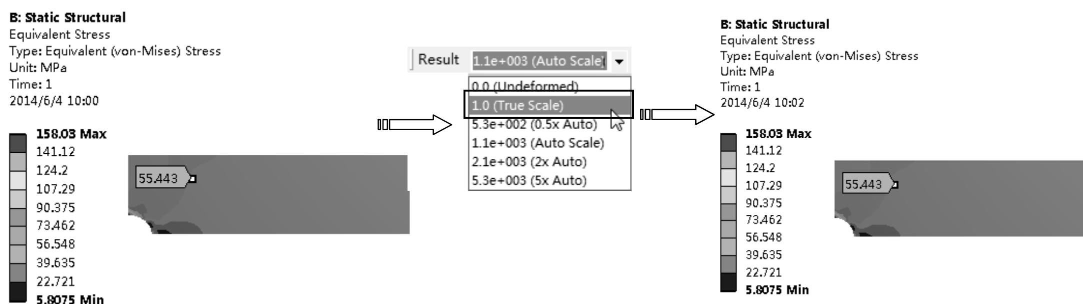


图 5-53　应力云图

4）插入构造几何。在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Model】工具栏上的【Construction Geometry】按钮插入构造几何，如图 5-54 所示。

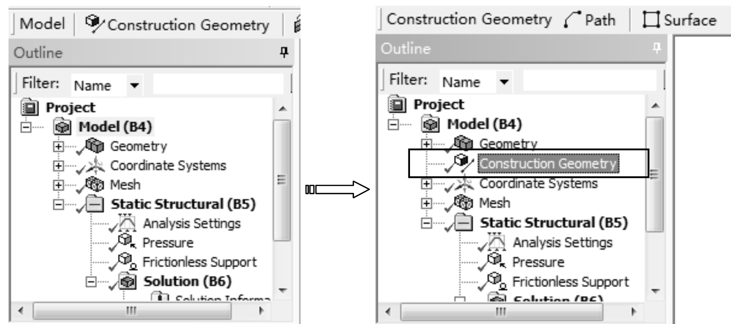


图 5-54　插入构造几何

5）创建路径。在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Construction Geometry】工具栏上的【Path】按钮 Path，单击【Point（选择点）】按钮，在详细设置窗口中单击【Start】选项下【Location】后的【Click to Change】项，在图形区选择一点作为起点，单击【End】选项下【Location】后的【Click to Change】项，在图形区选择一点作为终点，如图 5-55 所示。

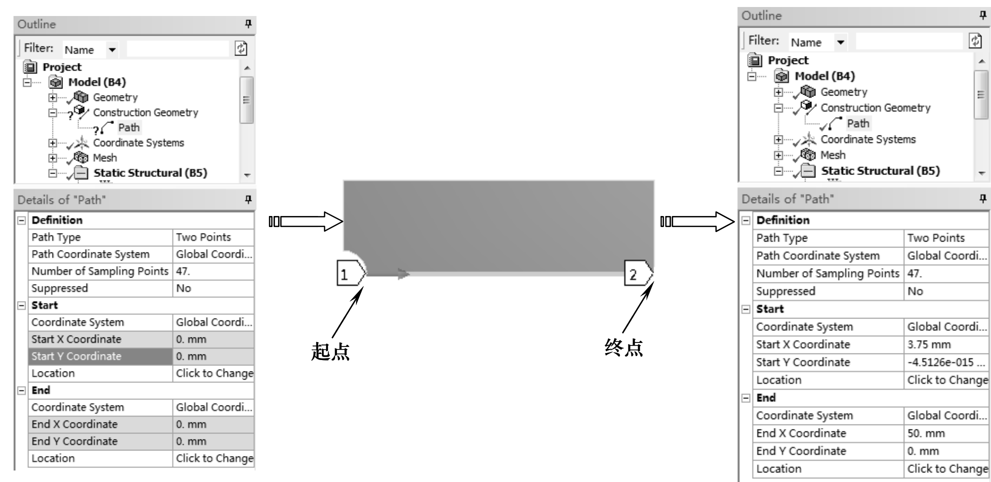


图 5-55 创建路径

6）映射路径。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，修改名称为【Path Equivalent Stress】，在详细设置窗口中选择【Scoping Method】为 Path，选择【Path】为 Path，如图 5-56 所示。

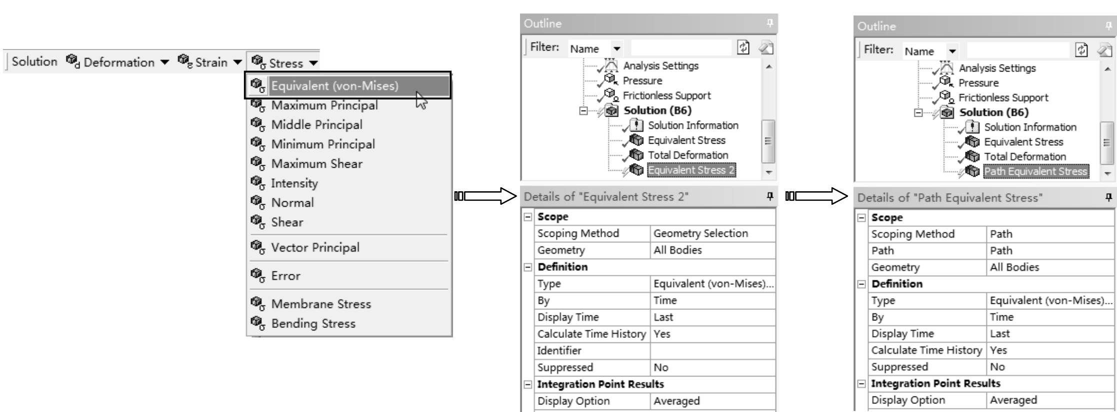


图 5-56 映射应力到路径

7）显示路径结果。在【Outline（分析树）】中选择【Path Equivalent Stress】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，在图形窗口显示路径上的应力分布，如图 5-57 所示。

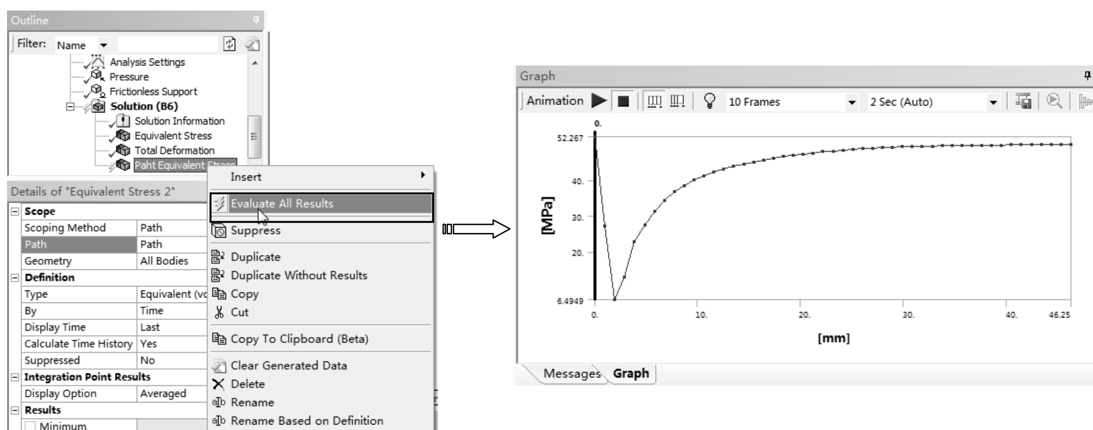


图 5-57　显示路径上的应力

9．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮，退出 ANSYS Workbench。

5.2.4　实例总结

本节以薄板为例讲解了 ANSYS Workbench 的平面类型零件的有限元分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中要注意以下几点：

1）ANSYS Workbench 结构静力学分析的操作步骤是：启动 Workbench→建立分析项目→建立几何模型→添加材料库→添加模型材料属性→划分网格→施加载荷和边界条件→设置求解项→求解→结果后处理等。

2）ANSYS Workbench 可进行面体二维分析，但要求模型必须在 *XY* 平面内，且在分析项目中选择【Geometry】并单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Properties】命令，在弹出的属性窗口中的【Analysis Type】下拉列表中选择二维分析类型。

5.3　实例 2——托架体的结构分析

5.3.1　实例说明

本例通过一个简单的固定托架体来分析在端面施加 1000N 的集中力作用时的变形和应力分布以及安全系数，如图 5-58 所示。

5.3.2　分析思路

本例为实体零件静力学分析，为了简化模型创建过程，采用 SolidWorks 软件构建模型，

然后导入到 Workbench 中进行分析，通过 Stress Tool 来获得安全系数。

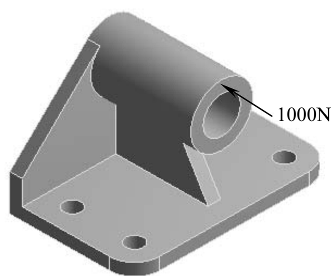


图 5-58　托架体

5.3.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 5-59 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 5-60 所示。

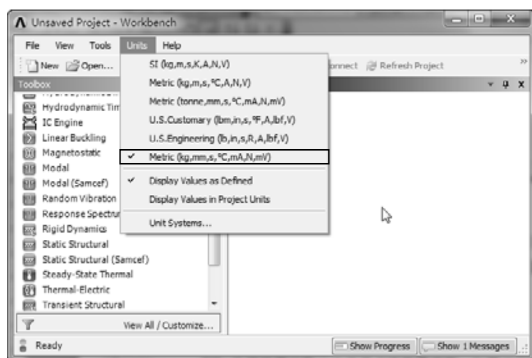


图 5-59　设置分析单位

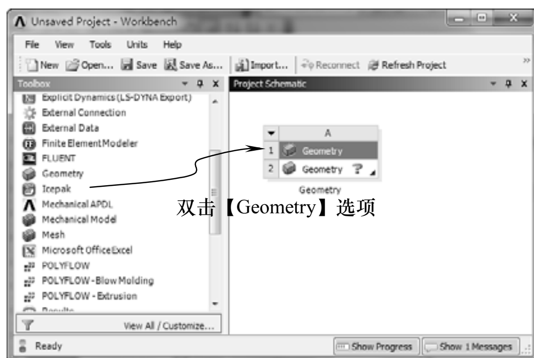


图 5-60　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structure】选项上按住鼠标并拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 5-61 所示。

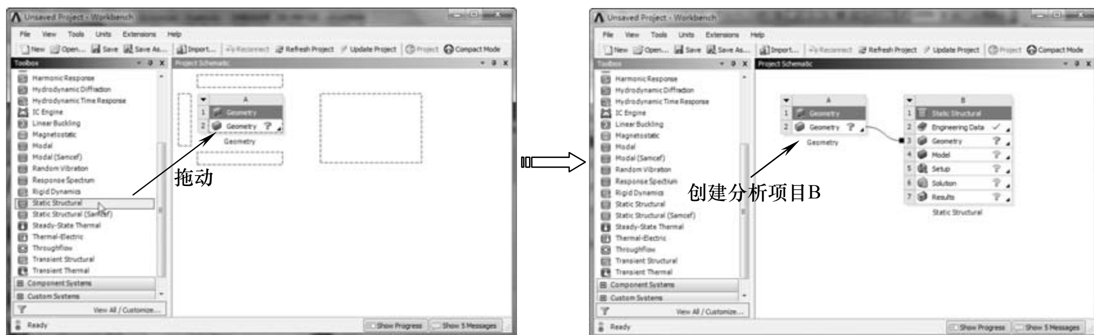


图 5-61　创建分析项目 B

2. 导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 5-62 所示，弹出【打开】对话框。

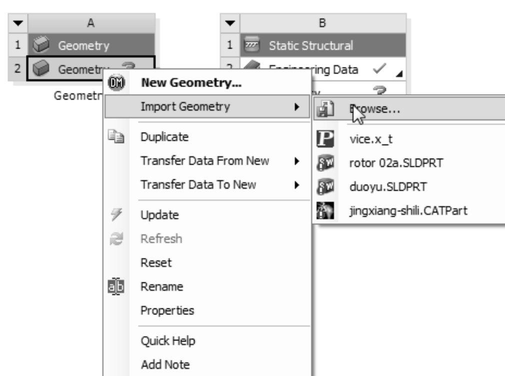


图 5-62　选择导入几何体命令

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter08\uncompletedframe.sldprt”几何体文件，如图 5-63 所示。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。



图 5-63　【打开】对话框

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 5-64 所示。

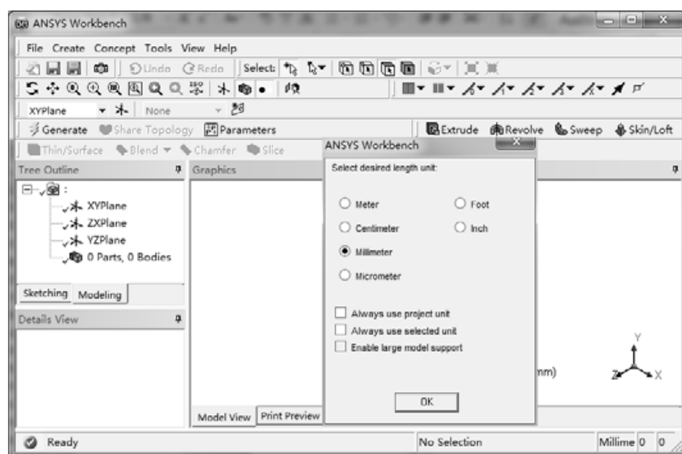


图 5-64　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 5-65 所示。

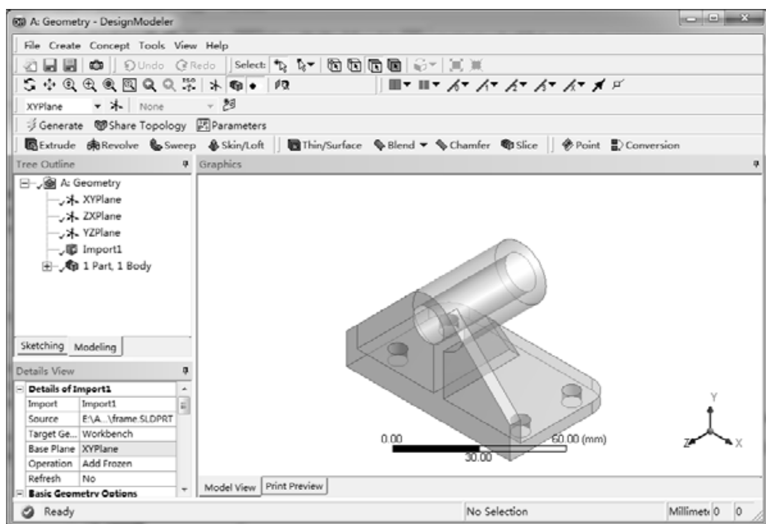


图 5-65　生成几何体后的 DesignModeler 界面

5）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入如图 5-66 所示的材料参数设置界面。

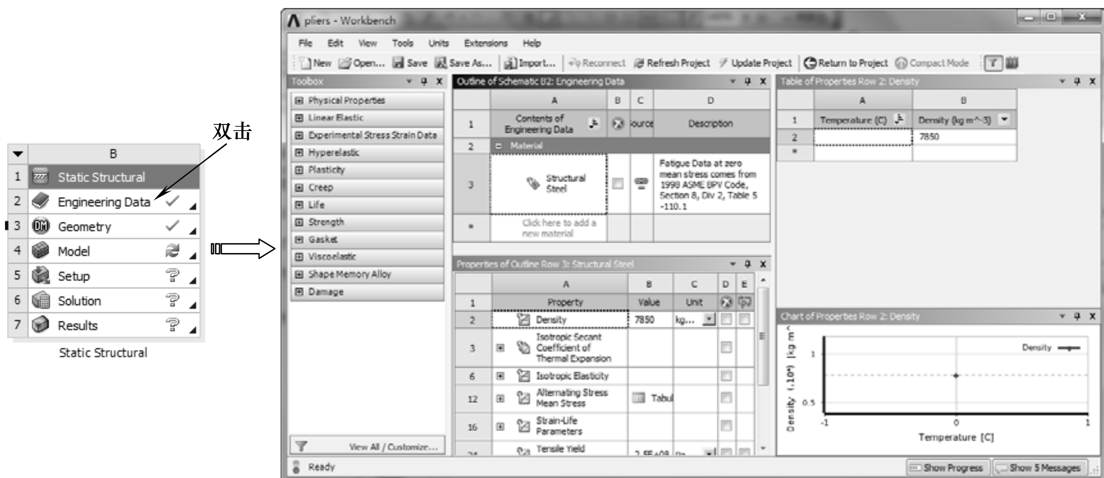


图 5-66　双击【Engineering Data】选项

2）在界面的空白处任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，原界面窗口中的【Outline of Schematic B2：Engineering Data】

窗口消失，取代以【Engineering Data Sources（工程数据源）】和【Outline of Favorite（优先列表）】窗口，如图 5-67 所示。

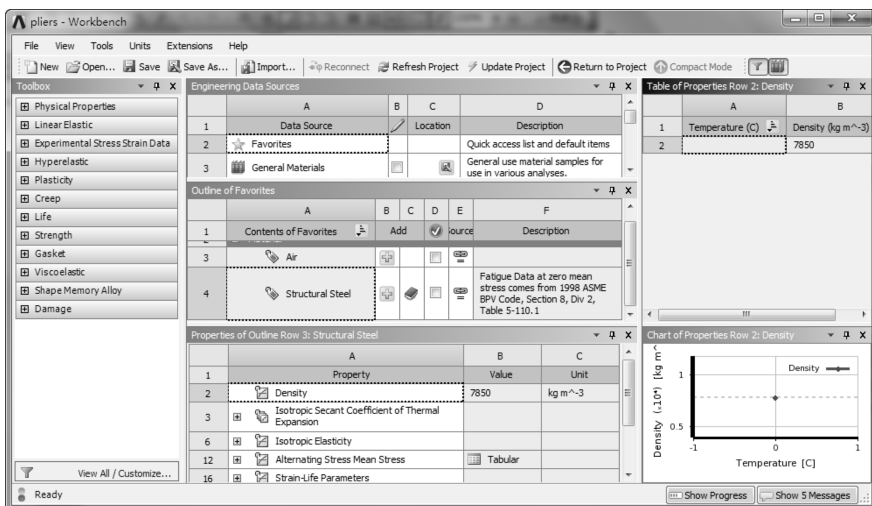


图 5-67　材料参数设置界面

3）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中 A3 栏中的【General Materials（通用材料）】项，出现【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口，如图 5-68 所示。

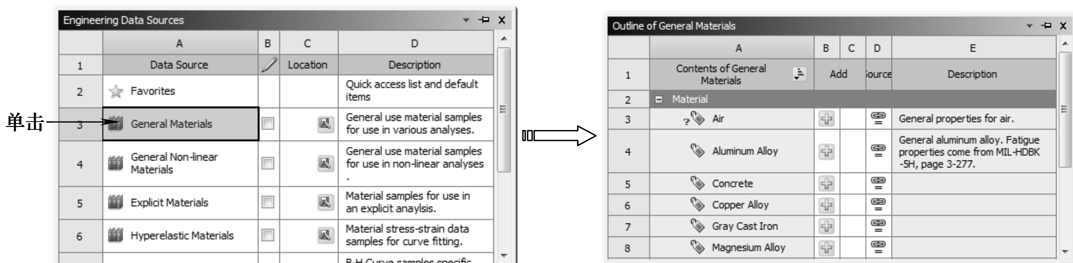


图 5-68　选择【General Materials】项

4）在【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口中单击 B11 栏的按钮，此时在 C11 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 5-69 所示。

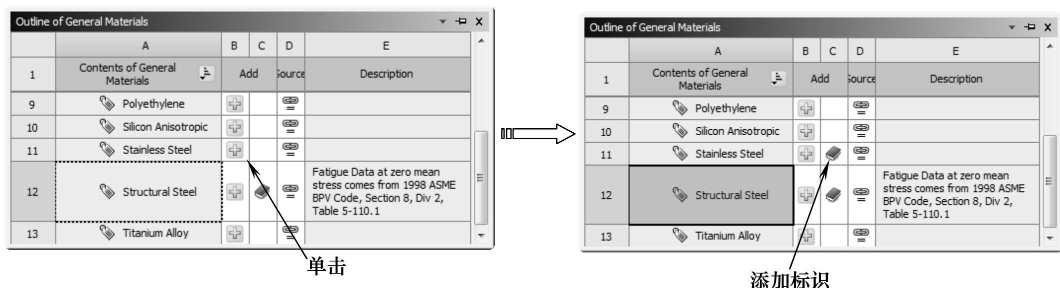


图 5-69　添加 Stainless Steel

5）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口并显示添加的材料。

6）单击【Return to Project】按钮 Return to Project ，返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 5-70 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 5-71 所示。

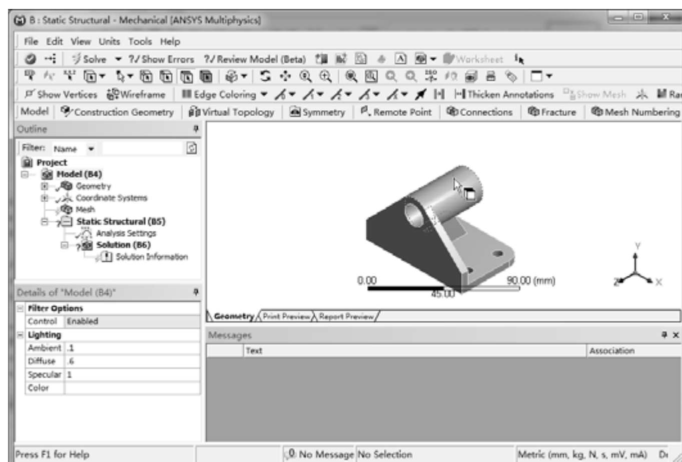


图 5-70 Mechanical 用户界面

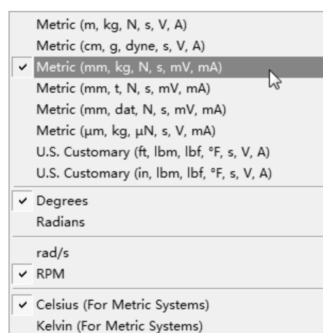


图 5-71 设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选择【Geometry】节点下的【bracket】选项，此时在【Details of "bracket"（参数列表）】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击 ▸ 按钮，选择【Stainless Steel】，将材料设置为不锈钢，如图 5-72 所示。

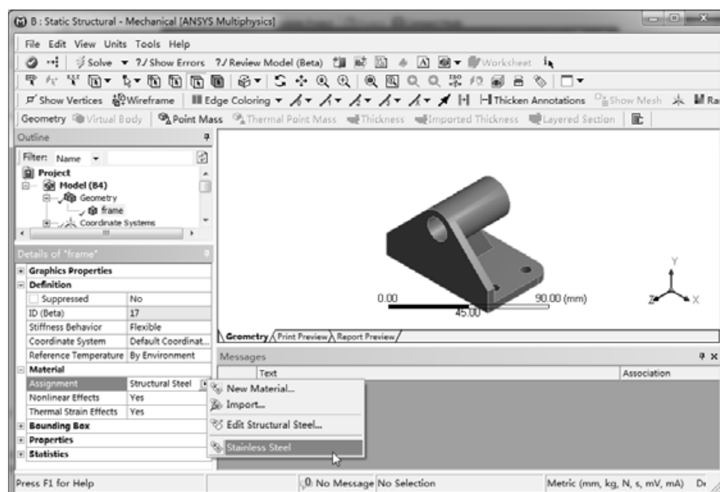


图 5-72 设置工件材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control

（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击窗口上方图形选择工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of“Body Sizing”Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区单击选择实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 3mm，如图 5-73 所示。

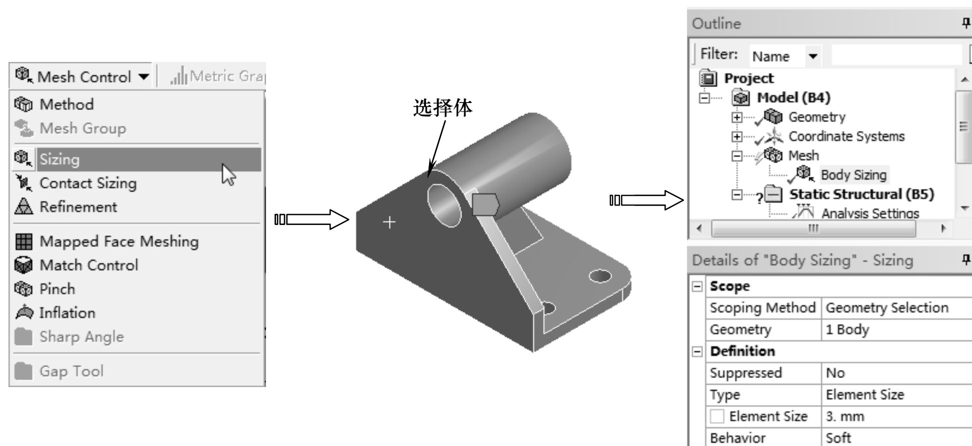


图 5-73　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 5-74 所示。

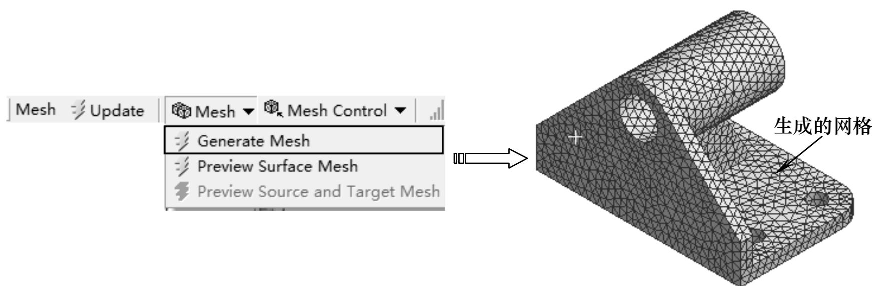


图 5-74　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，显示【载荷】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，按住<Ctrl>键选择如图 5-75 所示的 4 个圆柱面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 5-75 所示。

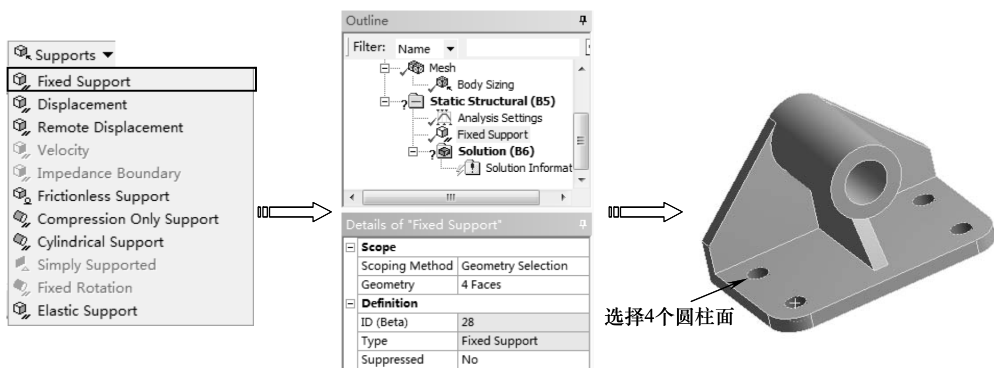


图 5-75 施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of "Force"】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 5-76 所示表面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 1000，如图 5-76 所示。

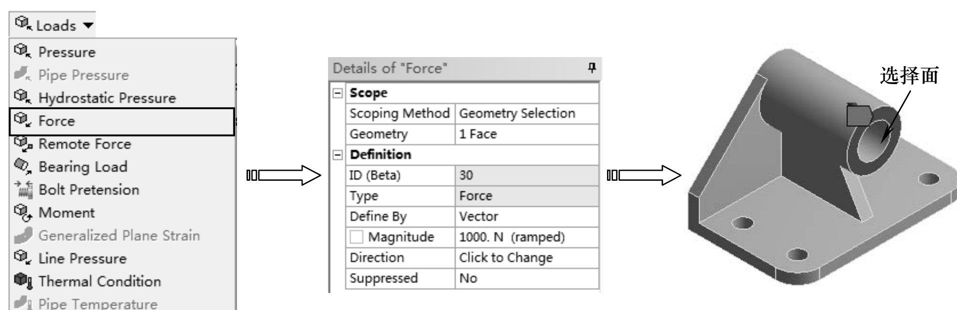


图 5-76 施加力

7. 设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 5-77 所示。

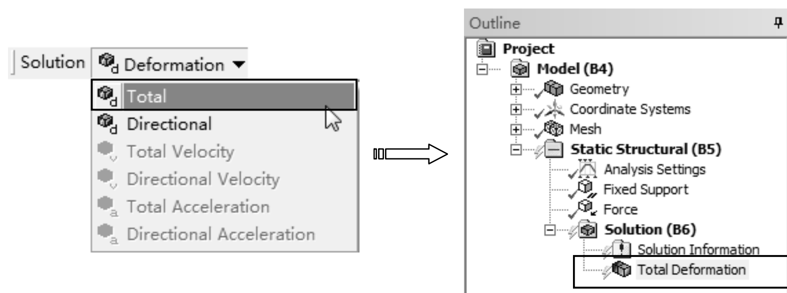


图 5-77 添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，

此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 5-78 所示。

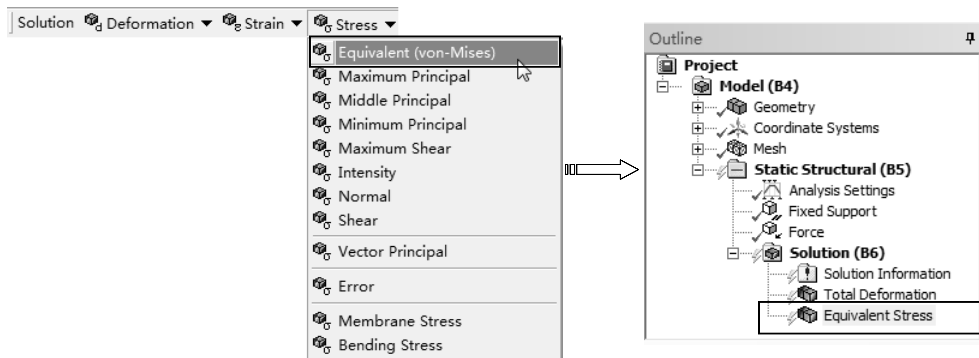


图 5-78　添加应力求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 5-79 所示。

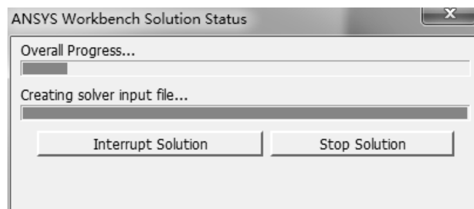


图 5-79　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation ，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 5-80 所示。

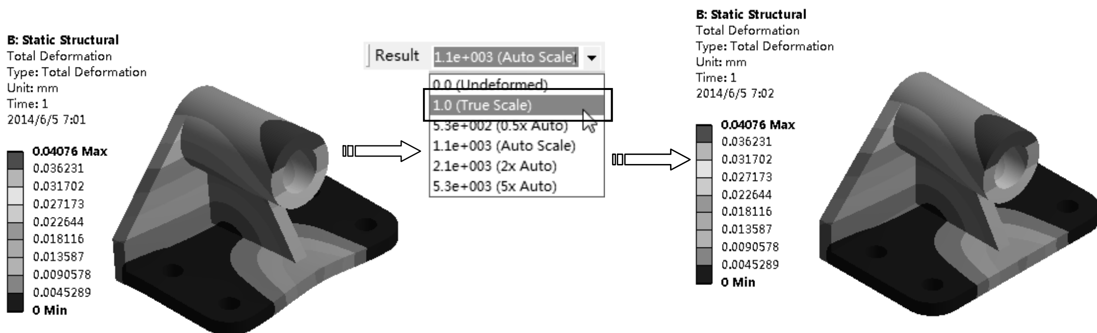


图 5-80　变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 5-81 所示。

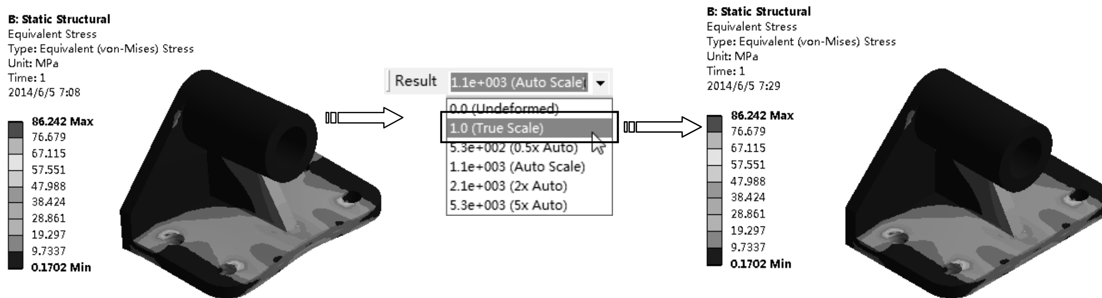


图 5-81　应力云图

4）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Tools】|【Stress Tool】命令，在【Solution】下增加【Stress Tool】节点，如图 5-82 所示。

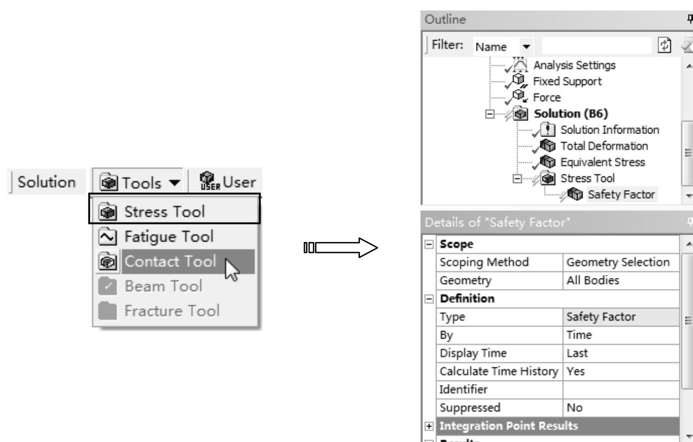


图 5-82　启动应力工具

5）选中【Safety Factor】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，然后单击【Stress Tool】项下的【Safety Factor】节点，以颜色方式显示安全系数分布图，如图 5-83 所示。

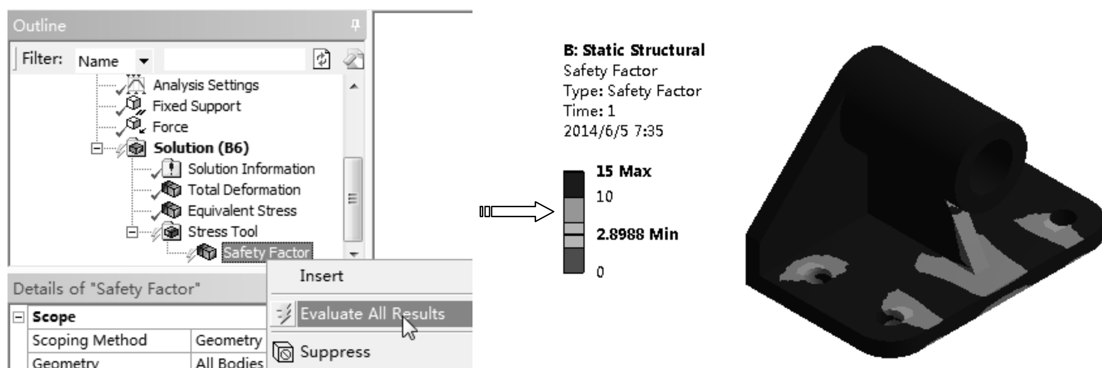
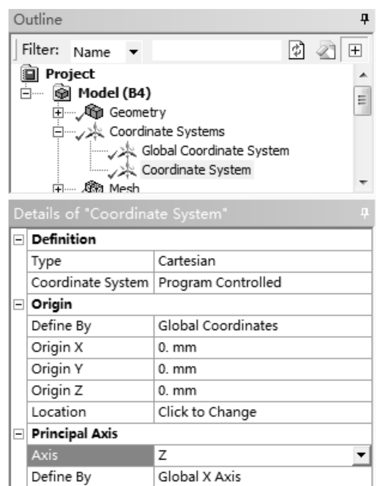


图 5-83　安全系数分布图

6）创建坐标系。在【Outline（分析树）】中选择【Coordinate System】节点，单击【Coordinate System】工具栏上的【Create Coordinate System】按钮，在分析树中自动插入【Coordinate System】节点，在详细设置窗口中定义【Origin】下的【Define By】为 Global Coordinates，设置【Principal Axis】下的【Axis】为 Z，如图 5-84 所示。



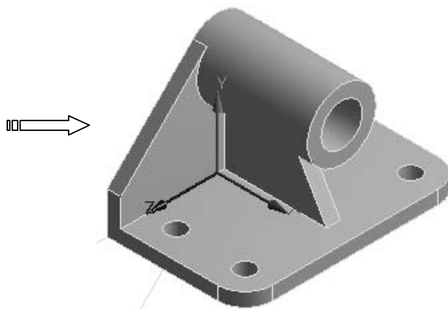
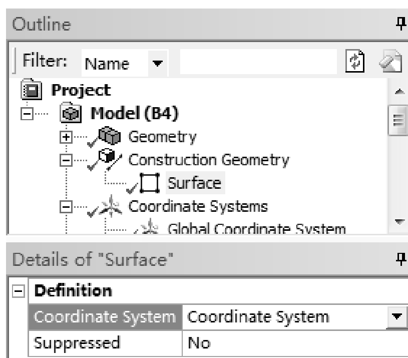


图 5-84　定义坐标系

7）创建表面。在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Model】工具栏上的【Construction Geometry】按钮，然后单击【Construction Geometry】工具栏上的【Surface】按钮 Surface，在【Details of “Surface”】列表中的【Coordinate System】下选择新创建的 Coordinate System，如图 5-85 所示。



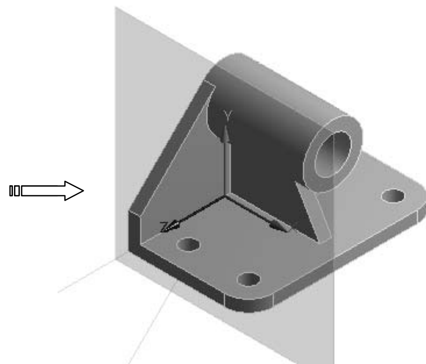


图 5-85　创建表面

8）映射表面。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，修改名称为 Surface Equivalent Stress，在详细设置窗口中选择【Scoping Method】为 Surface，选择【Surface】为 Surface，如图 5-86 所示。

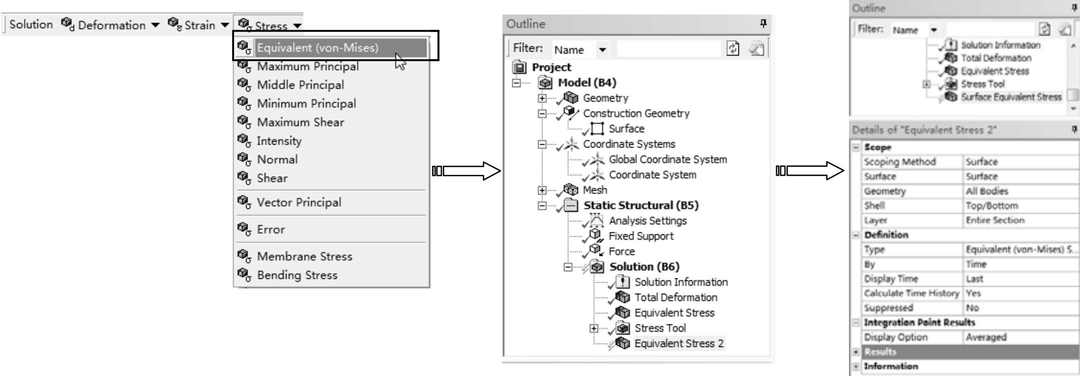


图 5-86　映射应力到表面

9）显示表面结果。在【Outline（分析树）】中选择【Surface Equivalent Stress】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，在图形窗口显示表面上的应力分布，如图 5-87 所示。

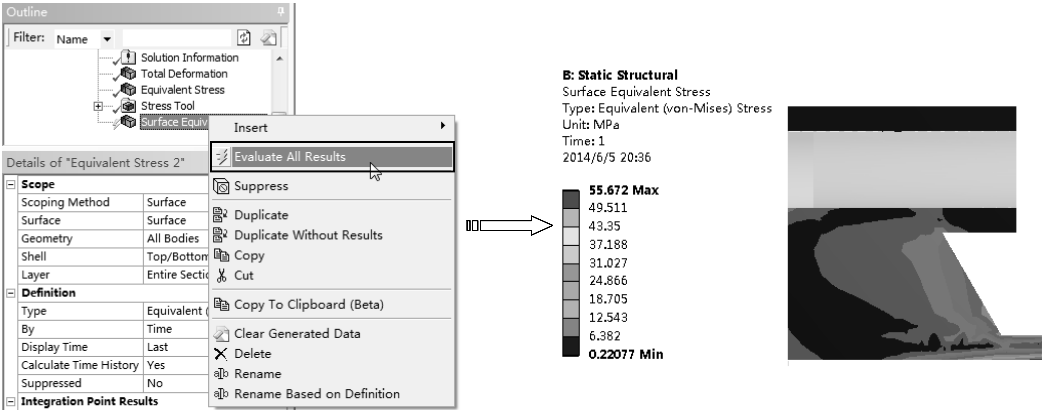


图 5-87　显示表面上的应力分布

9．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

5.3.4　实例总结

本节以托架体为例讲解了 ANSYS Workbench 的实体零件有限元分析的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：对于实体零件，为了简化建模可利用 SolidWorks、Catia 等 CAD 软件创建好模型，然后通过加载导入的方式连接到 ANSYS Workbench 中进行分析。

5.4　实例 3——拉杆式桁架的结构分析

5.4.1　实例说明

如图 5-88 所示拉杆式桁架，截面为 50mm×50mm 的矩形，左右上角固定，右边受载荷 F_x=10000N、F_y=15000N 压力作用。材料为钢，求其变形和应力分布。

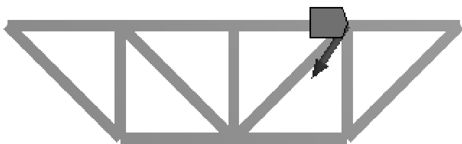


图 5-88　拉杆式桁架

5.4.2　分析思路

本例是一个工程中常见的桁架问题，可采用实体直接建模方法。本例中为了建模简化采用概念建模方式，即在 DesignModeler 中直接建立有限元梁，通过建立线体并赋予其截面特征来作为有限元分析中的梁模型。

5.4.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 5-89 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 5-90 所示。

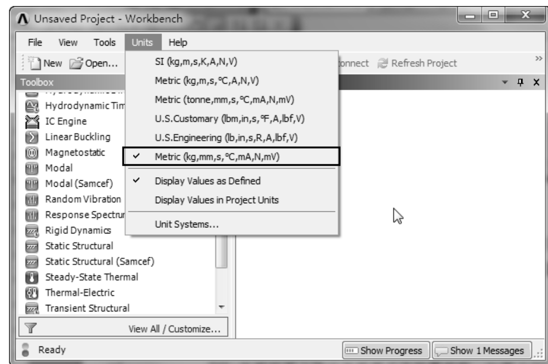


图 5-89　设置分析单位

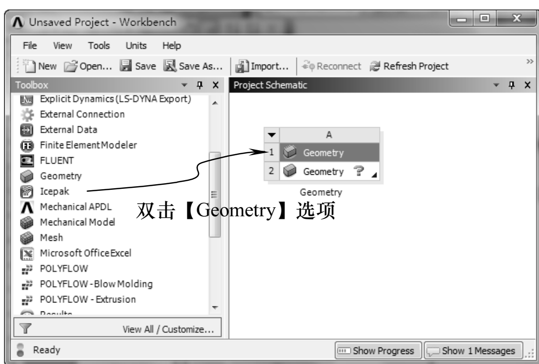


图 5-90　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structure】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 5-91 所示。

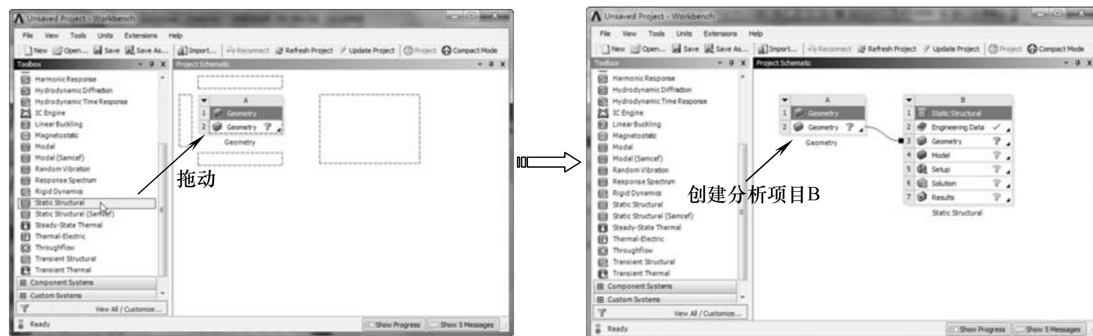


图 5-91　创建分析项目 B

2．建立几何体模型

1）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 5-92 所示。

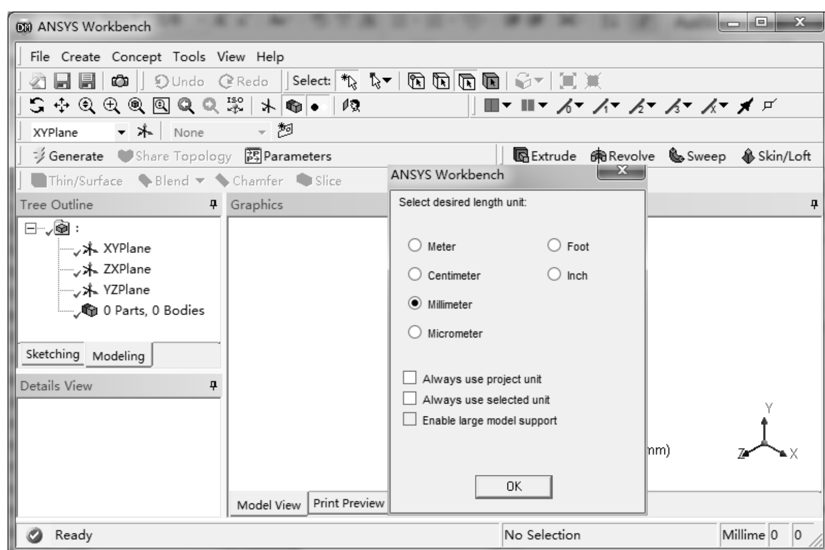


图 5-92　【ANSYS Workbench】对话框

2）在【Tree Outline（特征树）】中选择 XYPlane 平面，然后单击【Sketching】选项卡进入草绘状态。单击【图形显示控制】工具栏上的【Look at Face/Plane/Sketch】按钮可立即改变视图方向，使草图平面与视线垂直。

3）单击【Draw（草绘工具箱）】中的【直线】命令以及【Constraints（约束工具箱）】中的【约束】命令，【Dimensions（尺寸标注工具箱）】中的【尺寸标注】命令，绘制如图 5-93 所示的草图。

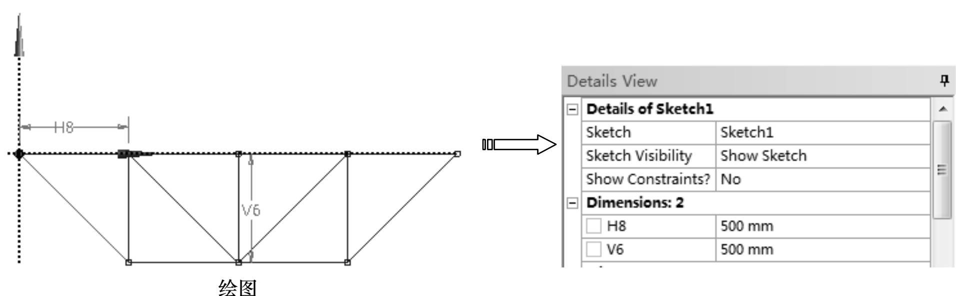


图 5-93　绘制草图

4）单击【Modeling】选项卡，选择绘制完成的草图 Sketch1，再选择【Concept】|【Lines From Sketches】命令，然后单击【Generate】按钮，系统自动生成线体，如图 5-94 所示。

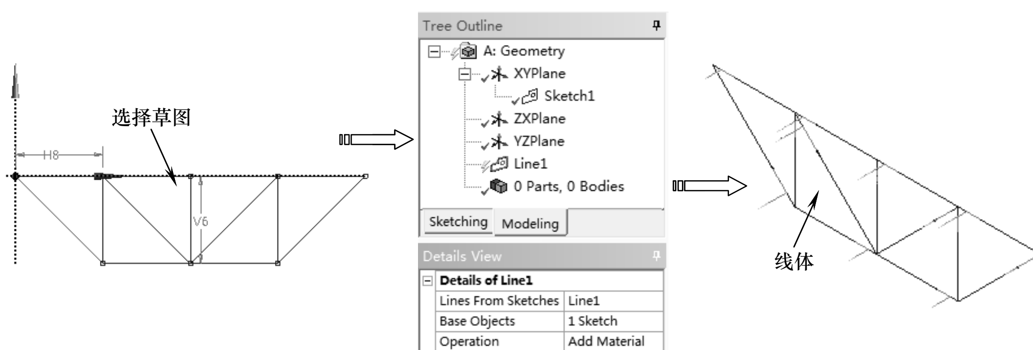


图 5-94　从草图生成线体

5）在【Concept】|【Cross Section】下选择所需的截面类型，特征树上出现【Cross Section】选项，同时图形区出现截面草图，可在详细设置窗口中设置截面参数 B=H=50，如图 5-95 所示。

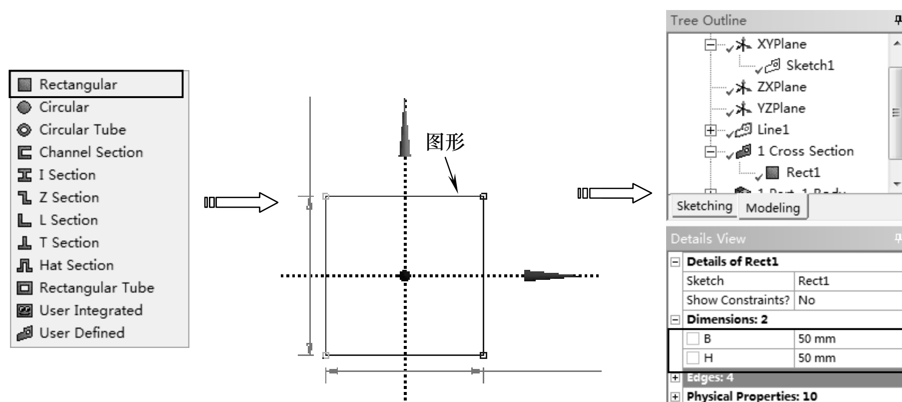


图 5-95　截面类型和尺寸

6）在特征树中选择【Line Body（线体）】节点，在详细设置窗口的【Cross Section】下选择截面类型 Rect1，单击【Generate】按钮即可将截面赋给线体，如图 5-96 所示。

7）选择【View】|【Cross Section Solids】命令，使命令前出现对号标志，显示创建的模型，如图 5-96 所示。

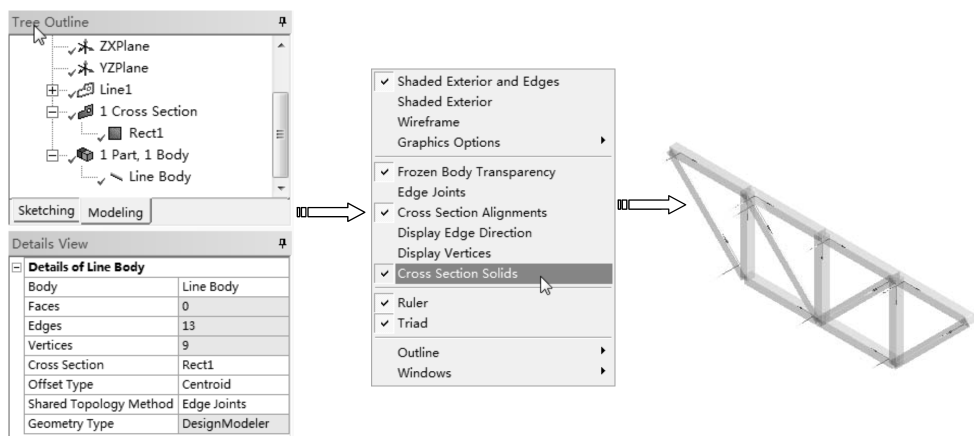


图 5-96　将截面赋给线体

8）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

9）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 5-97 所示。

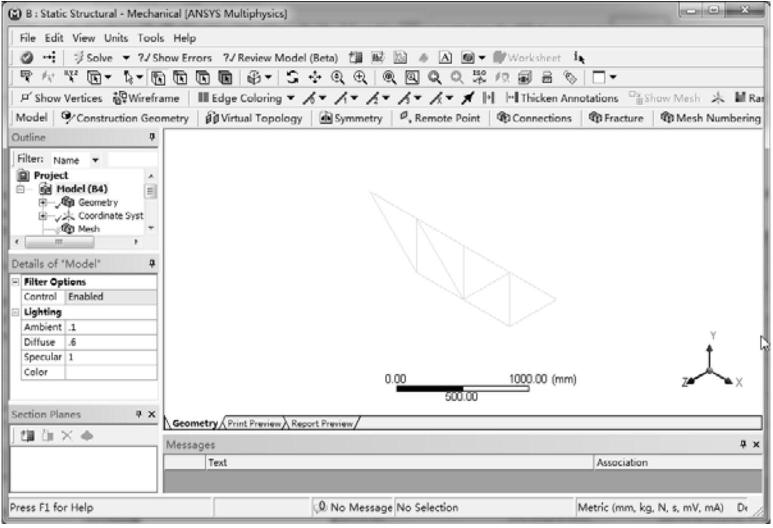


图 5-97　Mechanical 界面

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

3）单击窗口上方【图形选择】工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of "Body Sizing" Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区单击选择实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 50mm，如图 5-98 所示。

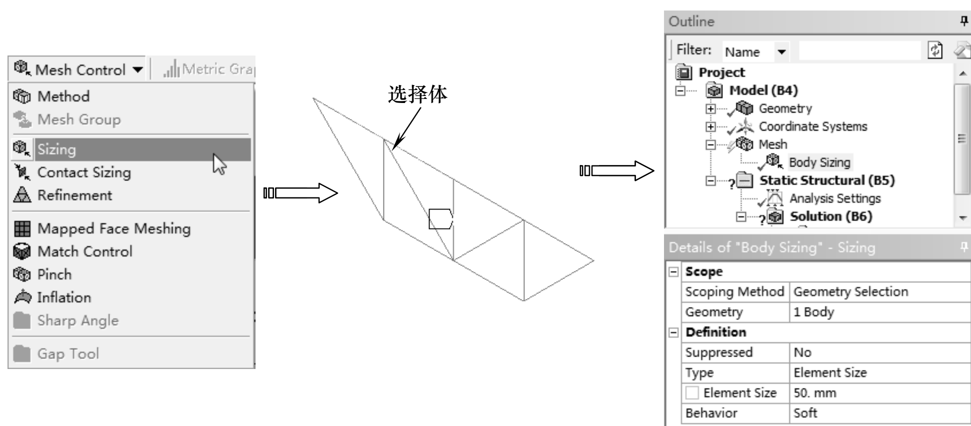


图 5-98　设置网格尺寸

4）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 5-99 所示。

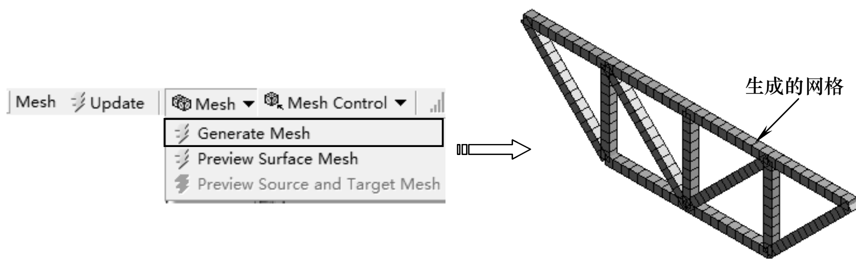


图 5-99　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，显示【载荷】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Point（选择面）】按钮，在【Details of "Fixed Support"】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择左上角点，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 5-100 所示。

3）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Displacement】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Point（选择面）】按钮，在【Details of "Displacement"】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】

项，选择右上角点，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，设置【X Component】为 Free，【Y Component】和【Z Component】为 0，如图 5-101 所示。

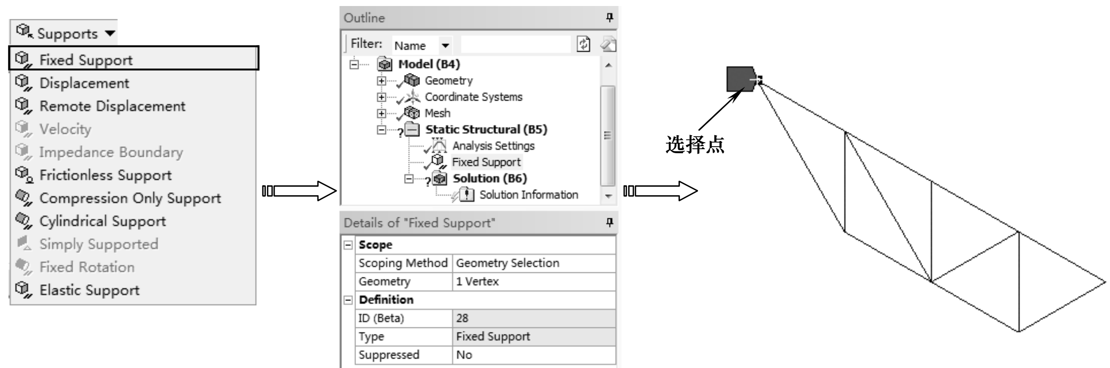


图 5-100　施加固定约束

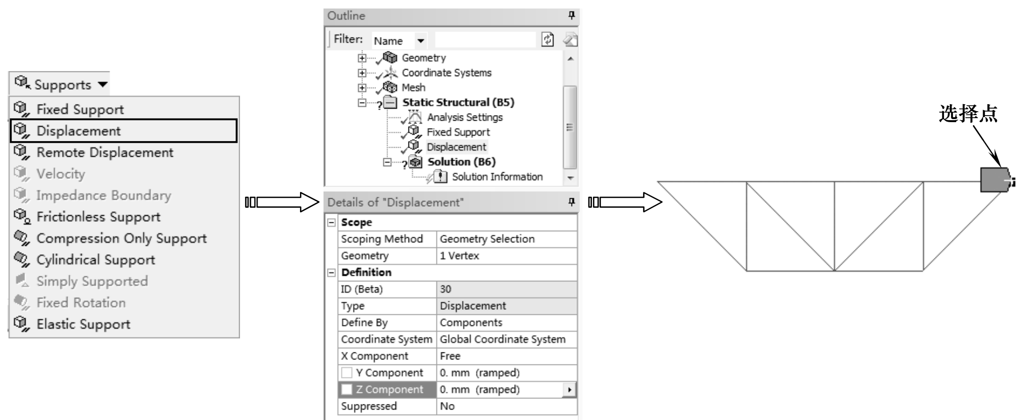


图 5-101　施加位移约束

4）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后单击【Point（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 5-102 所示的点。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【X Component】文本框中输入-10000，在【Y Component】文本框中输入-15000，如图 5-102 所示。

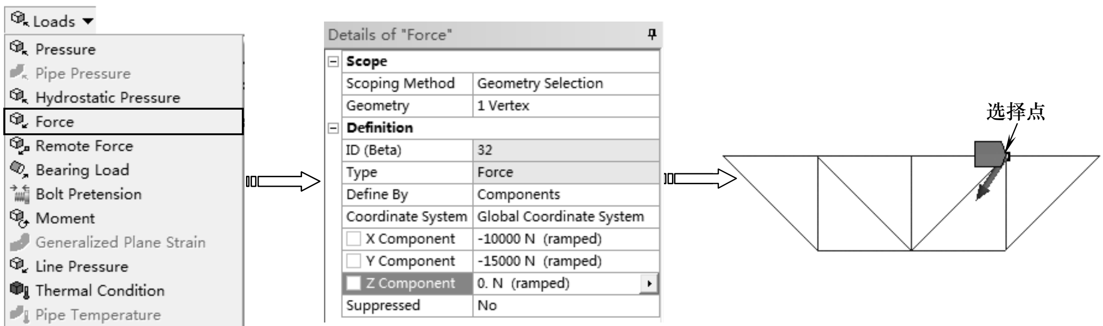


图 5-102　施加力

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 5-103 所示。

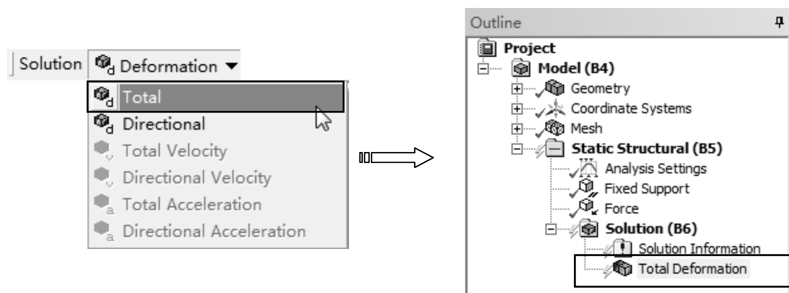


图 5-103　添加变形求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 5-104 所示。

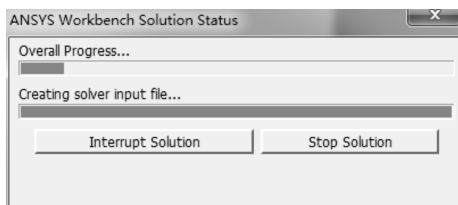


图 5-104　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 5-105 所示。

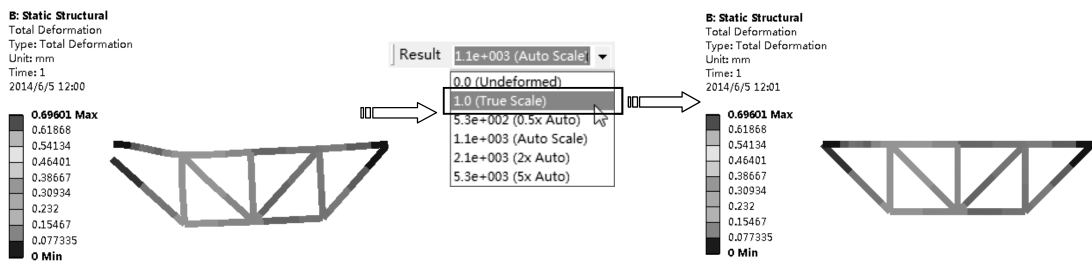


图 5-105　变形云图

3）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】

工具栏上的【Tools】|【Stress Tool】命令，在【Solution】下增加【Beam Tool】节点，如图 5-106 所示。

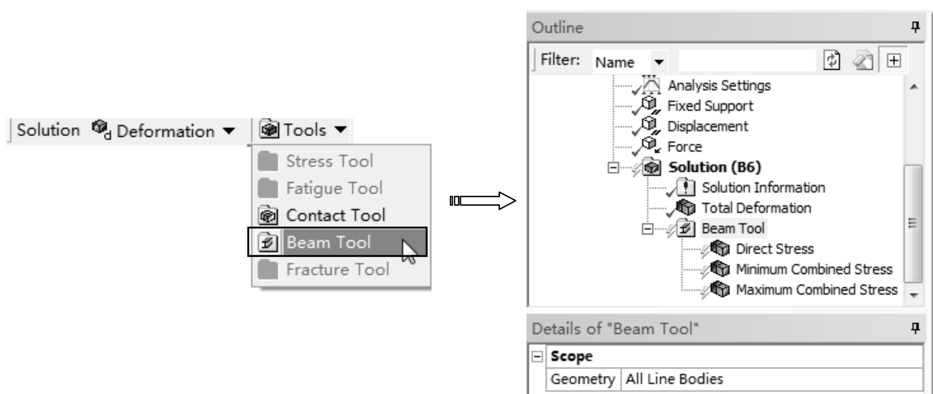


图 5-106　启动梁工具

4）选中【Beam Tool】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，然后单击【Beam Tool】项下的【Direct Stress】节点，以颜色方式显示直接应力，如图 5-107 所示。

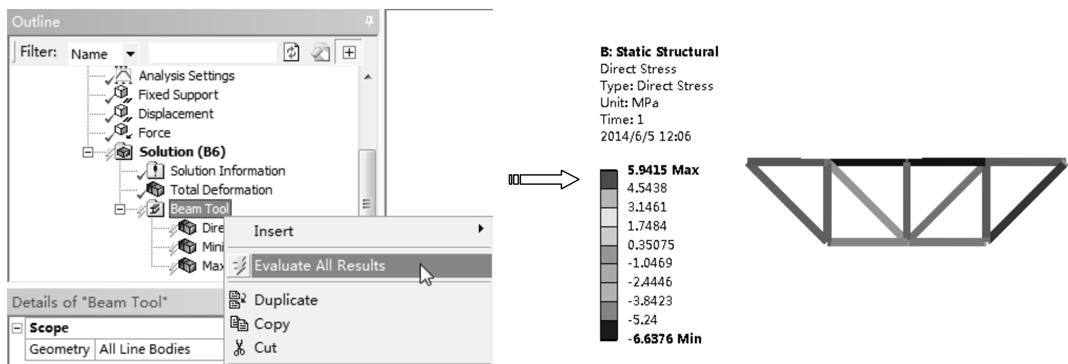


图 5-107　直接应力云图

9. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出 ANSYS Workbench。

5.4.4　实例总结

本节以桁架为例讲解了 ANSYS Workbench 的概念建模方法的具体应用步骤，读者在学习过程需要注意的是：线体可用来生成结构分析中的有限元梁模型，这样在初始设计和整体分析阶段，可花费较少的计算时间得到能够满足一般计算精度的计算结果。

5.5　本章小结

本章通过典型案例对结构静力学的一般分析步骤进行了详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。读者通过学习，可以举一反三，掌握应用 ANSYS Workbench 结构静力分析的操作方法和注意事项。

第 6 章　ANSYS 14.5 Workbench 结构动力学分析实例

结构动力学分析是用来确定惯性和阻尼起重要作用时结构动力学行为的技术。本章结合典型案例对结构动力学的一般分析方法与步骤进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。

6.1　结构动力学分析概述

结构动力学分析是用来确定惯性和阻尼起重要作用时结构动力学行为的技术，本节介绍结构动力学基本知识。

6.1.1　结构动力学简介

结构动力学是结构力学的一个分支，着重研究结构对于动载荷的响应（如位移、应力等的时间历程），以便确定结构的承载能力和动力学特性，或为改善结构的性能提供依据。结构动力学同结构静力学的主要区别在于，它要考虑结构因振动而产生的惯性力（见达朗伯原理）和阻尼力；而同刚体动力学之间的主要区别在于，要考虑结构因变形而产生的弹性力。

结构振动的幅值、频率和相位是振动的三要素。幅值是振动强度的标志，它可以用峰值、有效值、平均值等不同的方法表示。振动位移是研究强度和变形的重要依据；振动加速度与作用力或载荷成正比，是研究动力强度和疲劳的重要依据；振动速度决定了噪声的高低，人对机械振动的敏感程度在很大频率范围内是由振动速度决定的，振动速度又与能量和功率有关，并决定了力的动量。

不同的频率成分反映系统内不同的振源，通过频谱分析将测量所得的振动，利用傅里叶变换分解成不同零件各自的振动波形，可以确定主要频率成分及其幅值大小，由频率的分布判断发生振动的来源，进而采取相应的措施，如转轴或轴承。

振动信号的相位信息十分重要，相位分析就是将测量所得的振动，分解成不同零件各自的振动波形后，由频率的相位差异判断发生振动的模式，如转轴变形或转轴对心不良。因此，可利用相位关系确定共振点、测量振型、旋转件平衡、有源振动控制、降噪等。对于复杂振动的波形分析，各谐波的相位关系是不可缺少的。

结构动力学分析的最终目的是：确定在动力载荷作用下，结构的内力、位移、反力等量值随时间的变化规律，从而找出最大值，以作为设计分析的依据。

ANSYS Workbench 提供了 5 种结构动力学分析方法。下面分别加以介绍。

（1）模态分析（Modal）　ANSYS Workbench 采用模态分析，计算结构固有频率和振型。

如汽车尾气排气管的固有频率和发动机的固有频率相同时，可能被振散；受离心力作用的涡轮叶片会表现不同的动力学特性，这些问题都需要进行模态分析确定结构的振动特征。

（2）谐响应分析（Harmonic Response）　当激励为简谐函数时，谐波响应分析用于确定稳定简谐载荷下结构的响应。如回转机器对轴承和支撑结构施加稳态的交变作用力，这些作用力随旋转速度的不同而引起不同的偏转和应力，需要分析结构对稳态简谐载荷的响应。

（3）响应谱分析（Response Spectrum）　用于确定载荷谱对结构的响应分析，如地震响应谱作用下结构的振动。

（4）随机振动分析（Random Vibration）　用于确定随机载荷对结构的响应分析，如车辆运行中由于路面不平而引起的车辆振动，电子器件需要承受持续一段时间的变频率随机载荷，则需要随机振动分析。

（5）瞬态动力学分析（Transient Structural）　冲击载荷、突加载荷和快速移动载荷对结构瞬态动力分析，利用瞬态动力学可确定结构在静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随机组合下随时间变化的位移、应变、应力和力。

6.1.2　模态分析基础知识

执行动力学分析的第一步通常是计算忽略阻尼情况下的固有频率和振型，模态分析用于确定结构的固有频率和振型，也可以对有预应力的结构的模态进行分析，如旋转叶轮的模态分析等。

模态分析是研究结构动力特性的一种近代方法，是系统辨别方法在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性，每一个模态都具有特定的固有频率、阻尼比和模态振型。这些模态参数可以由计算或试验分析取得，这样一个计算或试验分析过程称为模态分析。这个分析过程如果是由有限元计算的方法取得的，则称为计算模态分析；如果通过试验将采集的系统输入与输出信号经过参数识别获得模态参数，则称为试验模态分析。

振动模态是弹性结构固有的、整体的特性。通过模态分析方法清楚了结构物在某一易受影响的频率范围内的各阶主要模态的特性，就可以预言结构在此频段内在外部或内部各种振源作用下产生的实际振动响应。因此，模态分析是结构动态设计及设备故障诊断的重要方法。机器、建筑物、航天航空飞行器、船舶、汽车等的实际振动千姿百态、瞬息变化，模态分析提供了研究各类振动特性的一条有效途径。模态分析可帮助设计人员确定结构的固有频率和振型，从而使结构设计避免共振，并指导工程师预测在不同载荷作用下的机构振动形式。

1．模态分析理论

模态分析的经典定义是将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标，使方程组解耦，成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程，以便求出系统的模态参数。坐标变换的变换矩阵为模态矩阵，其每列为模态振型。

无阻尼模态分析是经典的特征值问题，动力学问题的运动方程为

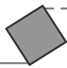
$$[M]\{\ddot{x}\}+[K]\{x\}=\{0\}$$

结构的自由振动为简谐振动，即位移为正弦函数：

$$x=x\sin\omega t$$

将其带入运动方程，可得

$$([K]-\omega^2[M])\{x\}=\{0\}$$



上述方程式经典的特征值问题，该方程的特征值为ω_i^2，ω_i就是自振圆频率，自振频率为$f=\omega_i/2\pi$，特征值对应的特征向量$\{x\}_i$为自振频率$f=\omega_i/2\pi$下对应的振型。

注意：模态分析实际上就是进行特征值和特征向量的求解，也称为模态提取。模态分析中材料的弹性模量、泊松比和材料密度是必须定义的。

2．有预应力的模态分析

受不变载荷作用下所产生的应力会影响到结构的固有频率，尤其是对那些在某一个或两个尺度方向上很薄的结构，因此有些情况下要考虑到预应力的影响。

执行预应力模态分析与进行标准模态分析基本相同，但需要注意以下几点：

✧ 必须通过施加载荷（结构或热载荷）的方式来确定结构的最初应力状态。
✧ 线性静态结构分析的机构能够在分析树 Solution 分支获得，而不是在 Frequency Finder 分支获得。
✧ Frequency Finder 分支里的应力或应变结果是一个特殊模态的对应应力/应变值。
✧ Solution 分支里的应力/应变/位移结果是静态载荷的真实应力/应变/位移结果。

3．模态分析设置

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Modal】上按住鼠标右键，拖动到项目管理区，即可创建模态分析项目，按从上到下的顺序执行模态分析，如图 6-1 所示。



图 6-1　创建模态分析项目

模态分析设置相关选项包括指定计算数、求解类型、输出控制等，如图 6-2 所示。

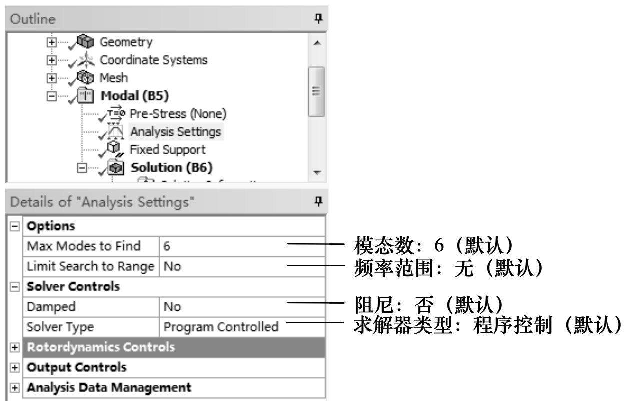


图 6-2　分析设置（Analysis Settings）

✧　Max Modes to Find：用于提取的模态阶数，限制在 1～20，系统默认为 6。
✧　Limit Search to Range：用于指定频率变化的范围，限制在 0～10e8Hz。
✧　Damped：用于设置阻尼，模态分析中忽略阻尼。
✧　Solver Type：用于选择求解器类型，系统提供了直接法和迭代法，一般由系统选择。

注意：Output Controls（输出控制）中系统默认仅计算振型，可选择应力和应变结果，这里应力结果不是真实的应力解，而是相对的应力分布显示。

6.1.3　谐响应分析基础知识

谐响应分析也称为频率响应分析或扫频分析，它是一种特殊的时域分析，计算结构在正弦激励（激励随时间呈正弦规律变化）作用下的稳态振动，也就是受迫振动分析，可计算相应幅值、频率等。

1．谐响应分析

谐响应分析是一种时域分析方法，用于确定线性结构在承受随时间按正弦（简谐）规律变化的载荷时的稳态响应，分析过程中只计算结构的稳态受迫振动，不考虑激振开始时的瞬态振动，如图 6-3 所示。

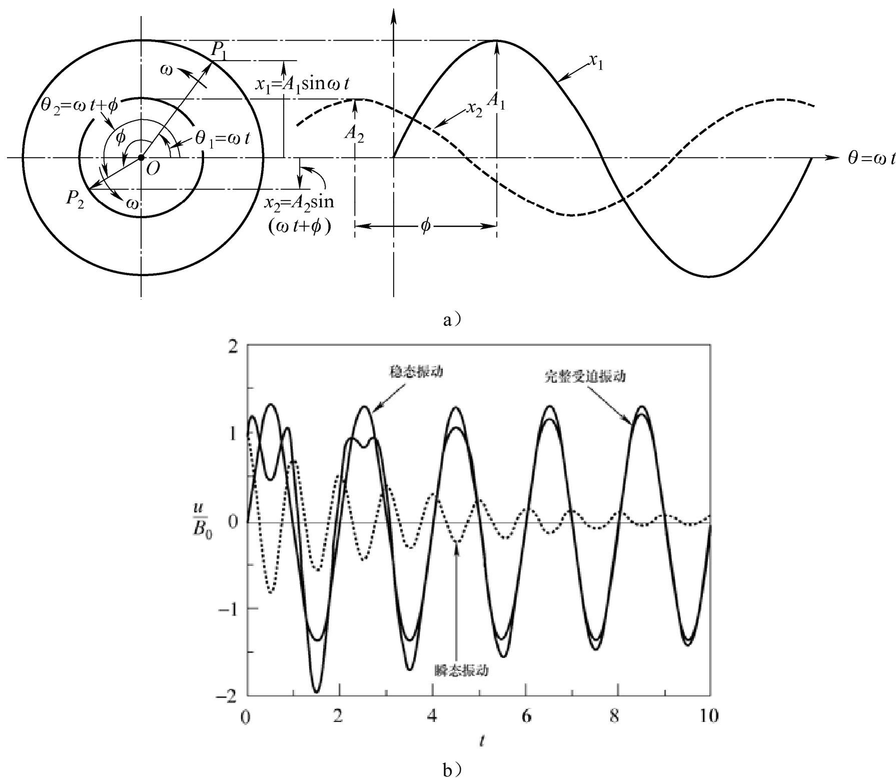


图 6-3　简谐振动与响应曲线

a）简谐振动　b）响应曲线

谐响应分析的目的在于计算出结构在几种频率下的响应值（通常是位移）对频率的曲线，从而使设计人员能预测结构的持续性动力特性，验证设计是否能克服共振、疲劳以及

其他受迫振动引起的有害效果。如旋转设备（如压缩机、发动机、泵、涡轮机械等）的支座、固定装置和部件；受涡流（流体的漩涡运动）影响的结构，例如涡轮叶片、飞机机翼、桥和塔等。

由经典力学理论可知，物体的动力学方程为

$$[M]\{\ddot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\}=\{F(t)\}$$

式中，$[M]$为质量矩阵；$[C]$为阻尼矩阵；$[K]$为刚度矩阵；$\{x\}$为位移矢量；$\{F(t)\}$为力矢量；$\{\dot{x}\}$为速度矢量；$\{\ddot{x}\}$为加速度矢量。

在谐响应分析中，力载荷为

$$F=F_0\sin\omega t$$

注意：Workbench 中所加谐波载荷的本性为：在已知频率下正弦变化；相角允许不同相的多个载荷同时作用，相角默认值为零；施加的全部载荷都假设是简谐的，包括温度和重力。

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Harmonic Response】上按住鼠标右键，拖动到项目管理区，即可创建谐响应分析项目，按从上到下的顺序执行谐响应分析，如图 6-4 所示。

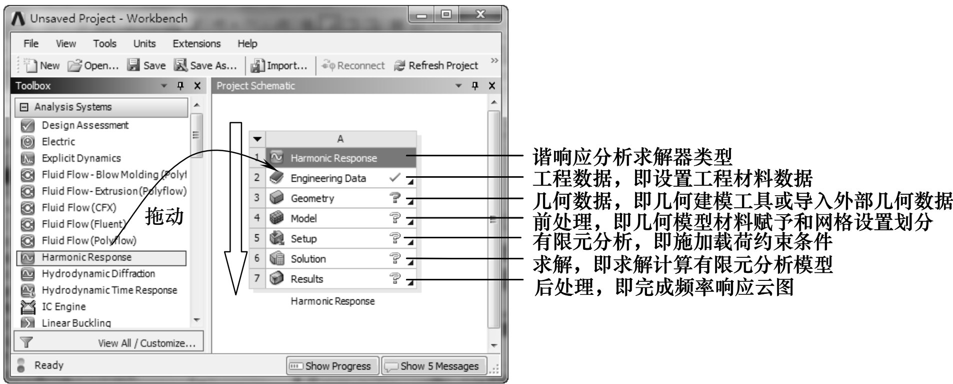


图 6-4 创建谐响应项目

2．载荷和约束

谐响应分析中，除重力载荷（Standard Earth Gravity）、热载荷（Thermal）、旋转速度（Rotational Velocity）、螺栓预紧载荷（Bolt Pretension）及仅有压缩约束（Compression Only Support）外，其他结构载荷及约束均可以施加，同时所有的结构载荷将以相同的激励频率呈正弦变化，见表 6-1。

表 6-1 简谐载荷

载 荷 类 型	相位角输入	求 解 方 法
加速度载荷	不支持	完全法或模态叠加法
压力载荷	支持	完全法或模态叠加法
集中力载荷	支持	完全法或模态叠加法
轴承载荷	不支持	完全法或模态叠加法
力矩载荷	不支持	完全法或模态叠加法
给定位移载荷	支持	完全法

谐响应分析中，一个简谐载荷由幅值、频率和相位角 3 个参数定义。如图 6-5 所示为施加力载荷时参数输入情况，幅值为 300，相位角为 60°，频率定义参见下面的“3．分析设置”相关介绍。

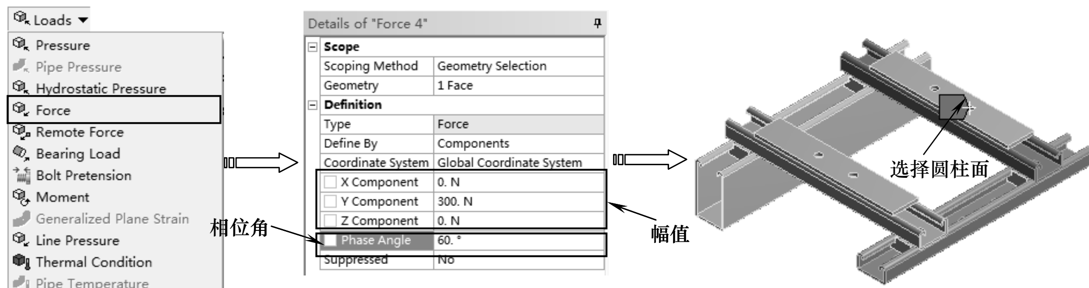


图 6-5　简谐载荷的幅值和相位角

3．分析设置

谐响应分析设置相关选项包括指定频率范围、求解间隔、求解方法、阻尼等，如图 6-6 所示。

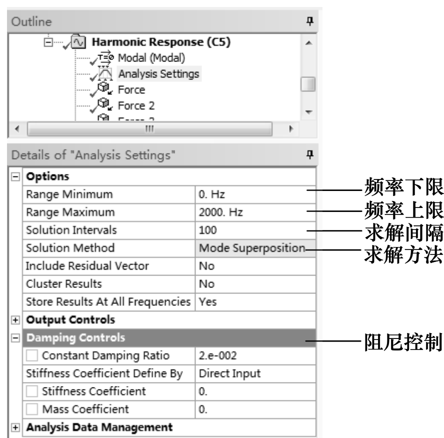


图 6-6　分析设置（Analysis Settings）

（1）Range Minimum、Range Maximum、Solution Intervals　用于设置频率的求解范围和求解间隔，频率为 0～2000Hz，采样点为 100 个，间隔为 20。推荐模态计算范围为最大谐响应分析频率的 1.5 倍。

（2）求解方法（Solution Method）　进行谐响应分析时，Mechanical 采用模态叠加法（Mode Superposition）、完全法（Full）对有限元方程进行求解。

✧ 模态叠加法（Mode Superposition）：通过对模态分析得到的振型乘以因子并求和来计算结构的响应。对于许多问题，其计算量比完全法少。该方法可考虑预应力效果，允许考虑阻尼，但不能施加非零位移。由于先进行了模态分析，得到了结构的固有频率，模态叠加法能够将结果聚敛到固有频率附近。

✧ 完全法（Full）：直接求解有限元方程，是最简单的一种方法。它采用完成的系数矩

阵计算谐响应，系数矩阵可以是对称的，也可以是不对称的。可以施加给定位移载荷，其确定是预应力选项不可用，有时计算量比较大。

4．后处理

（1）频率响应图　在谐响应分析的后处理中可显示响应跟随频率变化的频率响应图，图形结果包括应力、弹性应变、位移以及加速度的频率响应，其显示范围可以指定到结果的某一部分，如点、边或面，也可以显示在一定频率范围内的变化值。

单击【Solution】工具栏上的【Frequency Response】|【Stress】命令，此时在分析树中插入【Frequency Response】项，单击<F2>键，将其重新命名为 Frequency Response Stress。选择如图 6-7 所示的表面，在详细设置窗口设置【Orientation】为 Y Axis，如图 6-7 所示。

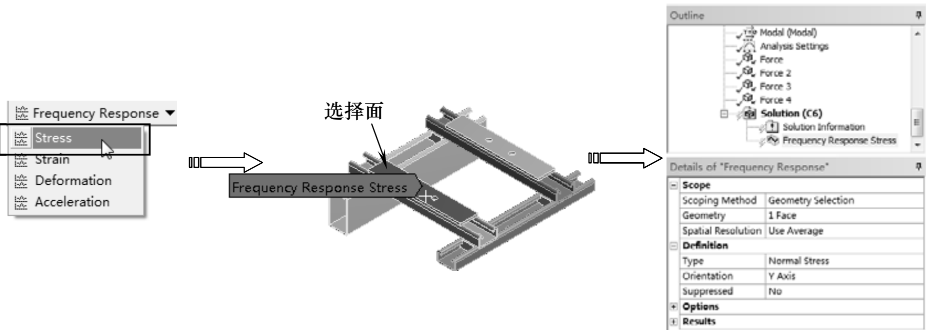


图 6-7　插入频率响应

在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Frequency Response Stress】项 Frequency Response Stress，可以观察到谐响应应力分析结果，如图 6-8 所示。

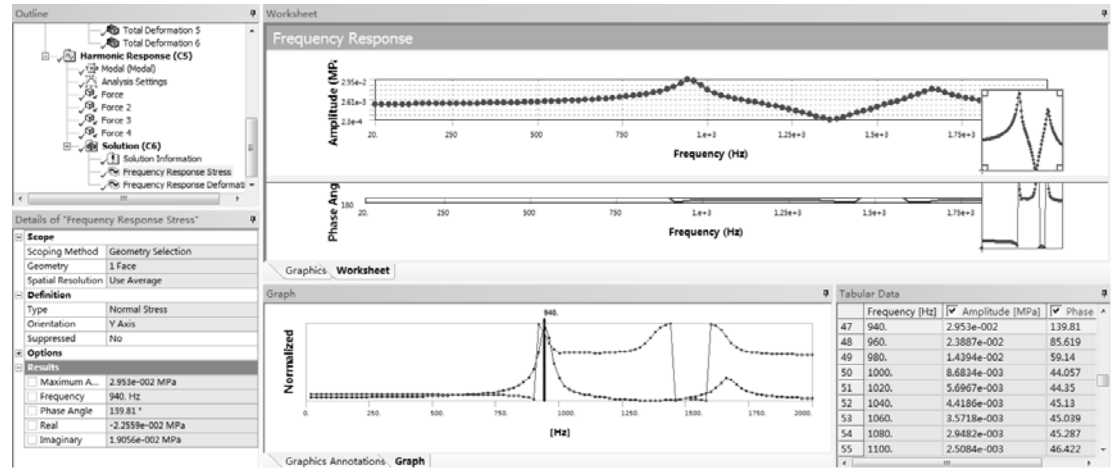


图 6-8　谐响应应力分析结果

（2）特定频率下的结果云图　在谐响应分析的后处理中，可以显示某一频率和相位角下的结果云图，包括应力、弹性应变和变形，这些结果必须定义一个频率和相位角。

单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，在详细设置窗口输入【Frequency】为 940。在【Outline（分析树）】中选

择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图，如图 6-9 所示。

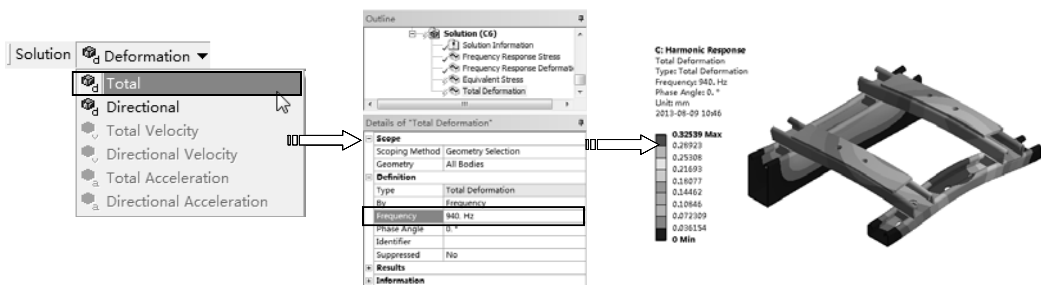


图 6-9　变形云图

（3）特定频率下的相位响应图　在谐响应分析的后处理中可显示响应滞后载荷多少相位的相位角响应图，图形结果包括应力、弹性应变、位移的相位响应。

单击【Solution】工具栏上的【Phase Response】|【Stress】命令，此时在分析树中插入【Phase Response】项，选择如图 6-10 所示的表面，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 6-10 所示。

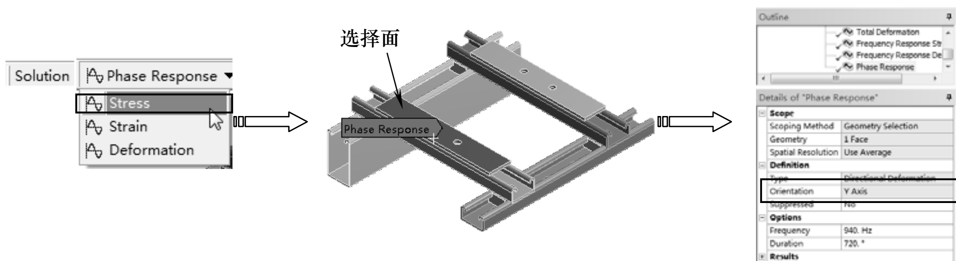


图 6-10　插入相位响应求解项

在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Phase Response】项 Phase Response，可以观察到谐响应相位响应图，如图 6-11 所示。

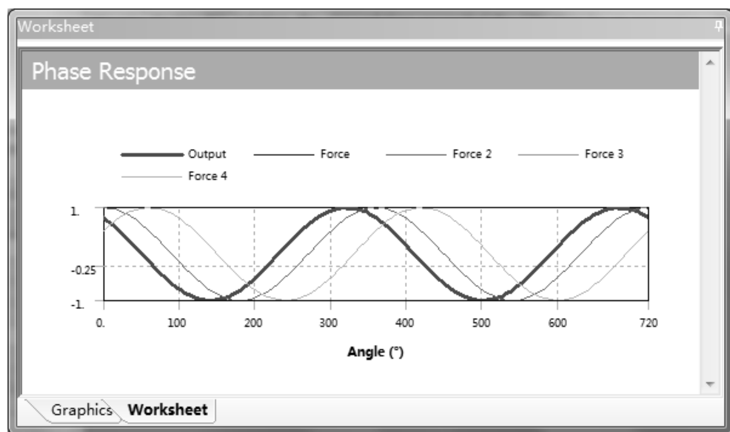


图 6-11　相位响应图

6.1.4　响应谱分析基础知识

响应谱分析（Response Spectrum）是一种将模态分析结果和已知谱联系起来的计算结果位移、速度、加速度、力、应力的分析方法。响应谱分析可以认为是取代耗时的时间域瞬态分析的一种方法，如果用户只想知道结构的峰值响应，而不是针对整个时间历程，可以采用响应谱分析快速地分析结构的峰值响应（如动应力等）。

为了构建响应谱，用户需要随时间变化的瞬态加速度载荷，激发加速度在一定质量和刚度下受制于单自由度的振荡器，如果知道振荡器的质量和刚度，便可知道它的频率，然后测量振荡器的峰值响应（一般为加速度），这给用户提供了响应频率上的一个数据点，峰值响应绘制在 y 轴，而振荡器的自然频率绘制在 x 轴，如图 6-12 所示。然后对带不同自然频率的振荡器重复上述过程，再次测量相同的瞬态载荷下的峰值响应，并在相应频谱的基础上绘制图解。

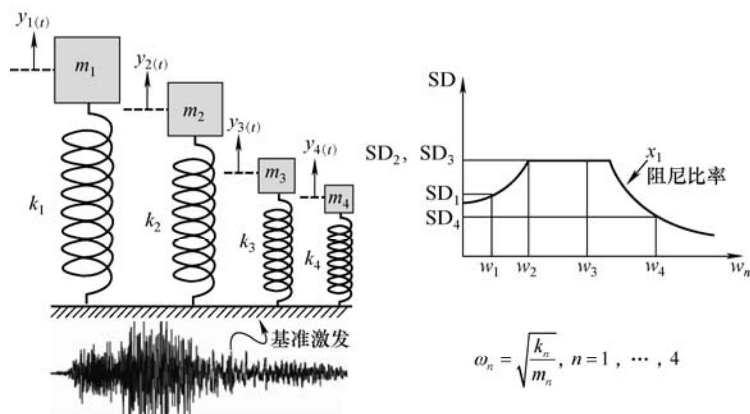


图 6-12　响应曲线

响应谱分析可以作为一种设计工具，它用于计算结构对多频信息瞬态激励的响应，这些激励可能来源于地震、飞行噪声/飞行过程、导弹发射等。频谱是载荷时间历程在频率域上的表示法，可以使用响应波谱分析而非时间历程分析，来估测结构对随机载荷或与时间有关的载荷环境（例如地震、风载荷、海浪载荷、喷气发动机推力或火箭发动机振动）的响应。

在进行响应谱分析的过程中，常涉及以下几个概念。

（1）参与因子　用来衡量模态振型在激振方向上对变形的影响程度（进而影响应力）。参与因子是振型和激励方向的函数，对于结构的每一阶模态 i，程序需要计算该模态在激励方向上的参与因子γ_i。参与因子计算式为

$$\gamma_i=\{x\}_i^{\mathrm{T}}[M]\{D\}$$

式中，x_i 为第 i 阶模态按照 $\{x_i\}^{\mathrm{T}}[M]\{x_i\}=1$ 式归一化的振型位移向量；$[M]$为质量矩阵；$\{D\}$为描述激励方向的向量。

（2）模态因子　模态因子是与振型相乘的一个比例因子，从二者的乘积可得到模态最大响应。

（3）模态有效质量　模态 i 的有效质量可以按照下式进行计算，即

$$M_{ei}=\frac{\gamma_i^2}{\{x_i\}^{\mathrm{T}}[M]\{x_i\}}$$

由于模态位移满足 $\{x_i\}^{\mathrm{T}}[M]\{x_i\}=1$ 归一化条件，即

$$M_{ei}=\gamma_i^2$$

（4）模态组合　给定每个模态在给定频谱下的最大响应后，将这些响应以某种方式进行组合就可以得到系统的总响应。

ANSYS Workbench 提供了 3 种模态组合计算方法：SRSS（平方根法）、CQC（完全平方组合法）、ROSE（倍和组合法），而 SRSS 组合的结果通常比其他两个要保守些。

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Modal】上按住鼠标左键，拖动到项目管理区，然后拖动【Response Spectrum】到【Modal】项目，按照分析项目从上到下的顺序执行响应谱分析，即可创建响应谱分析项目，如图 6-13 所示。



图 6-13　创建响应谱分析项目

注意：响应谱分析是根据模态响应计算的，因此需要先进行模态分析，激励必须施加在固定自由度处。

响应谱分析的求解步骤如下：

1．载荷和约束

载荷和约束是有限元分析计算的边界条件，响应谱分析中载荷的相关内容如下：

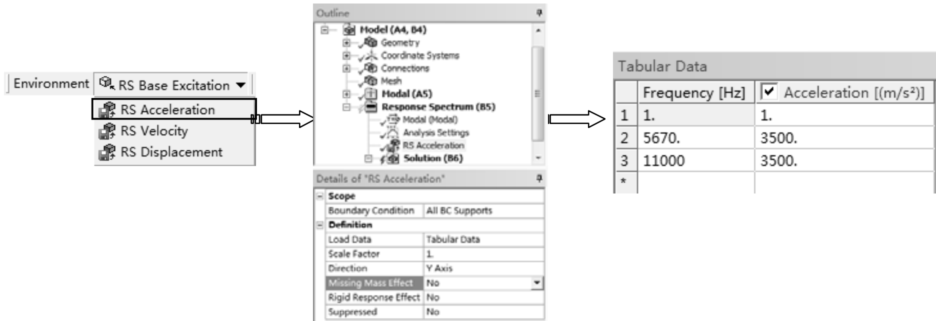
（1）约束　约束是在模态分析的基础上添加的，可使用的位移边界条件类型有：固定支承（Fixed Support）、位移载荷（Displacement）、远端位移（Remote Displacement）、连接实体和机架的弹簧。如果在模态分析时定义了一个或多个固定支承，则响应谱分析输入的激励谱就施加在这些固定支承上。

远端位移不能和其他约束条件并用在同一个施加激励的位置，否则将被忽略。

为了在单点响应谱分析中施加响应谱载荷，必须至少定义一个使自由度固定的位移边界条件，包括固定支承（Fixed Support）、位移载荷（Displacement）、远端位移（Remote Displacement）、连接实体和机架的弹簧。

（2）输入激励　响应谱分析中的载荷称为输入激励谱，包括位移激励谱（RS Displacement）、速度激励谱（RS Velocity）、加速度激励谱（RS Acceleration）。

单击【Environment】工具栏上的【RS Base Excitation】|【RS Acceleration】命令，在【Details of “RS Acceleration”】列表中选择【Scope】选项下的【Boundary Condition】项为 All BC Supports，在【Definition】选项下的【Load Data】中选择 Tabular Data，然后在右侧的【Tabular Data】窗口中输入相关数据，如图 6-14 所示。



	Frequency [Hz]	Acceleration [(m/s²)]
1	1.	1.
2	5670.	3500.
3	11000	3500.
*		

图 6-14　施加加速度激励谱

注意：对于单点响应谱分析，输入的激励谱施加于模态分析中定义的所有位移边界条件上。对于多点响应谱分析，一个输入激励谱只与一个位移边界条件关联。

2．分析设置

响应谱分析设置相关选项包括指定响应谱计算模态、指定响应谱分析类型、指定模态响应的组合方法等，如图 6-15 所示。

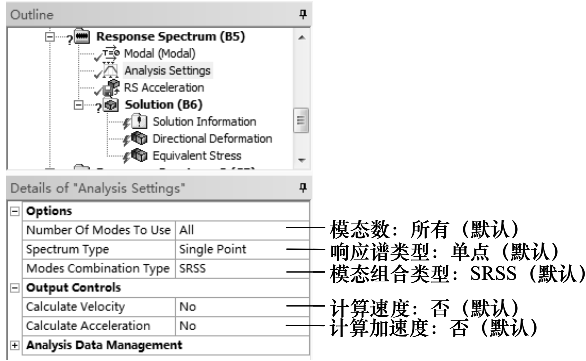


图 6-15　分析设置（Analysis Settings）

- ✧ Number of Modes To Use：用于指定响应谱计算的模态数，推荐模态计算范围为最大响应谱频率的 1.5 倍。
- ✧ Spectrum Type：用于定义响应谱类型，包括 Single Point（单点响应谱）和 Multiple Points（多点响应谱）。如果输入的响应谱应用于所有的固定自由度，则采用单点响应谱，否则采用多点响应谱。
- ✧ Modes Combination Type：用于指定模态组合类型，包括 3 种模态组合计算方法：SRSS（平方根法）、CQC（完全平方组合法）、ROSE（倍和组合法）。
- ✧ Calculate Velocity 和 Calculate Acceleration：程序默认仅计算位移响应，如需速度和加速度，则设置相关选项为 Yes。

6.2　实例 1——轴和轴承座模态分析

6.2.1　实例说明

如图 6-16 所示轴和轴承座，材料为结构钢，左侧端部作用 10N・m 的扭矩，试求其前 6 阶模态。

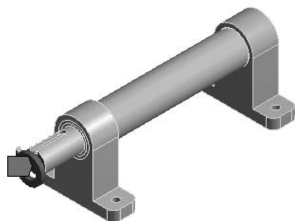


图 6-16　轴和轴承座模型

6.2.2　分析思路

本例是一个工程常见带有预应力的模态分析问题，因此分析时首先通过静力学分析得到静力分析结果，然后再传递给 Modal 分析，通过设置位移量得到其前 6 阶频率和振型。

6.2.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 6-17 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 6-18 所示。

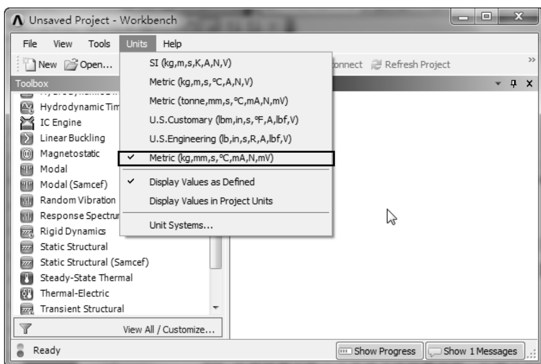


图 6-17　设置分析单位

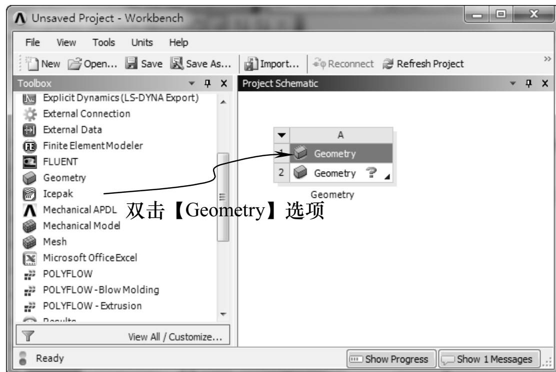


图 6-18　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structure】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 6-19 所示。

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Modal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 6-20 所示。

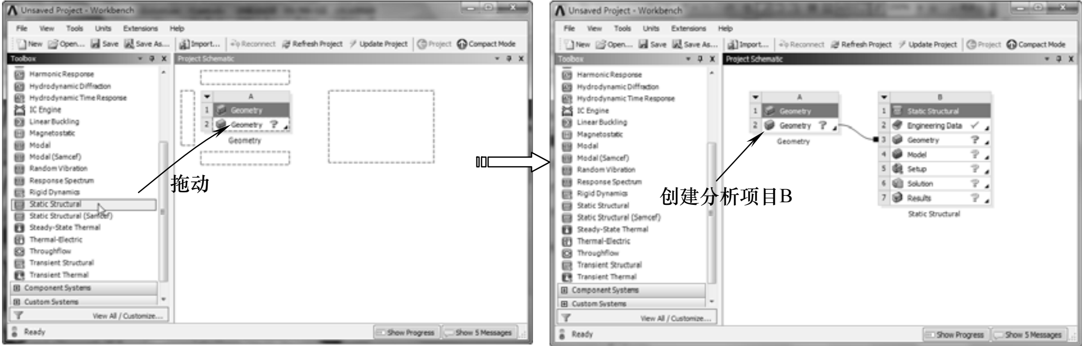


图 6-19　创建分析项目 B

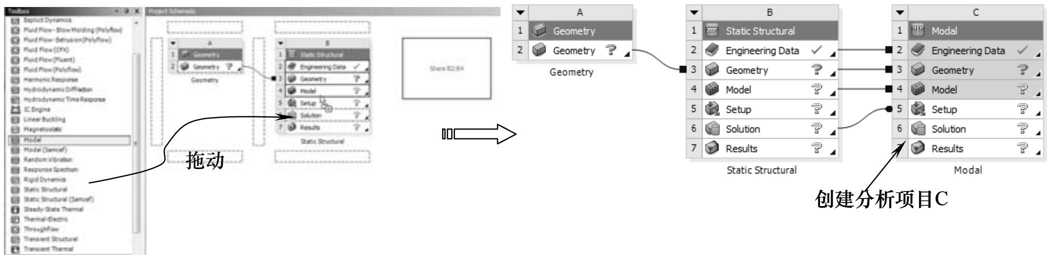


图 6-20　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 6-21 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter08\uncompletedframe.sldprt”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的？变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 6-22 所示。

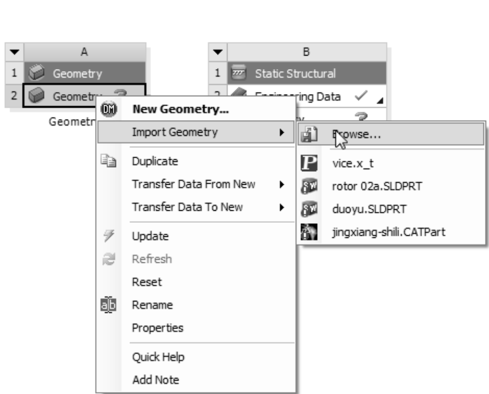


图 6-21　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

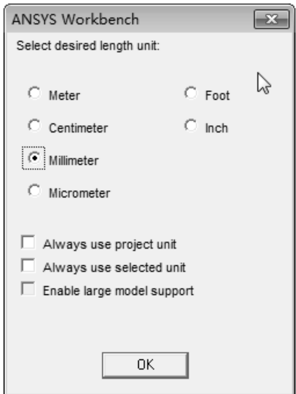


图 6-22　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没

有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 6-23 所示。

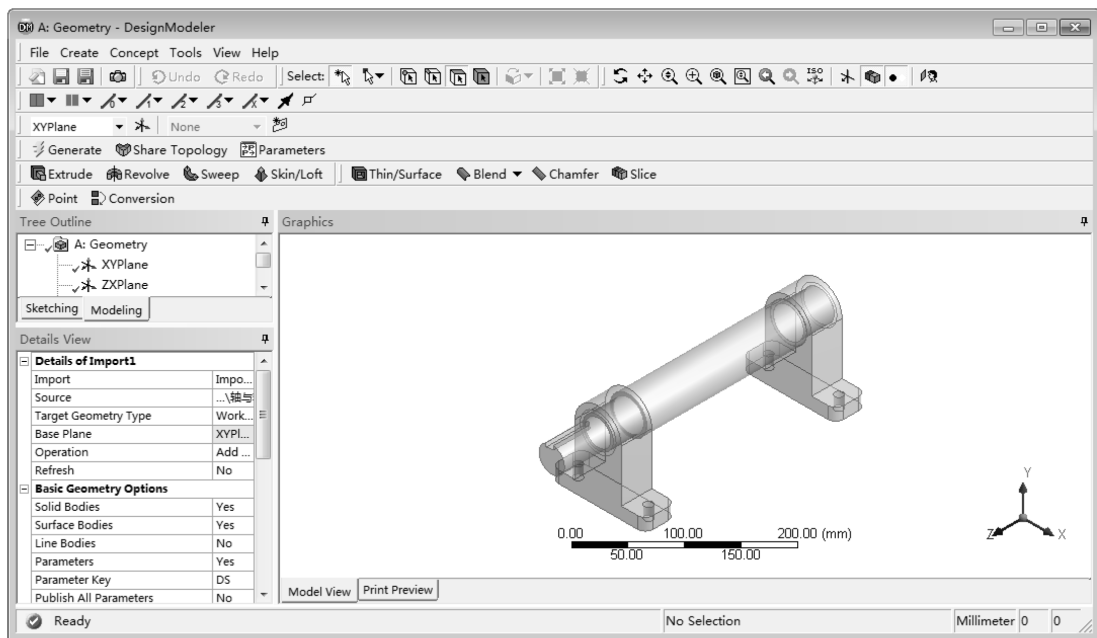


图 6-23　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏中的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 6-24 所示。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击窗口上方【图形选择】工具栏上的【Body（选择体）】按钮 ，在【Details of“Body Sizing”Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区单击选择实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 6-25 所示。

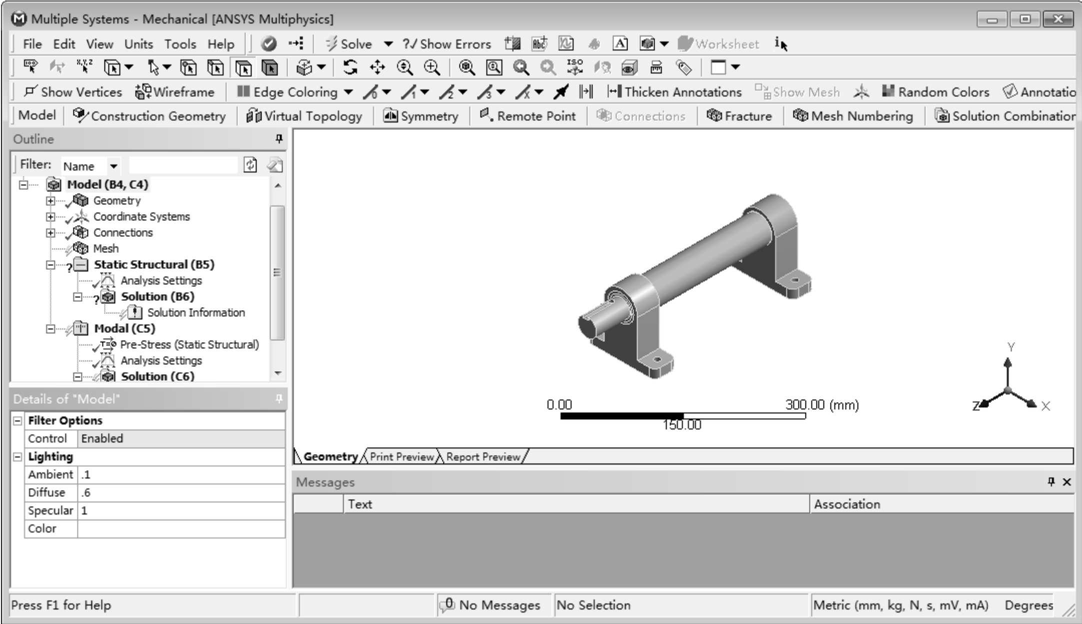


图 6-24　Mechanical 界面

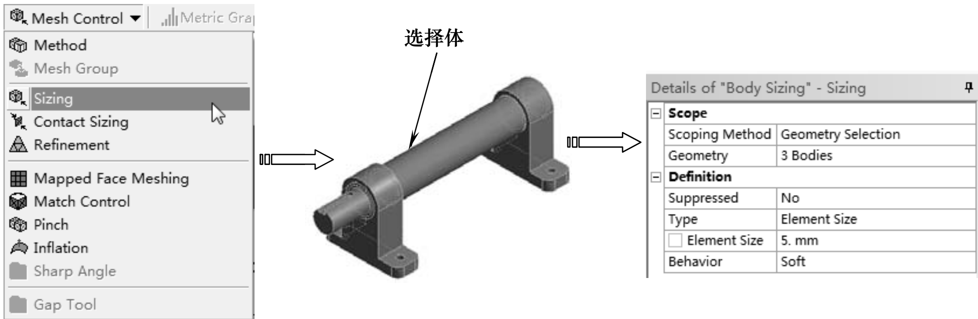


图 6-25　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 6-26 所示。

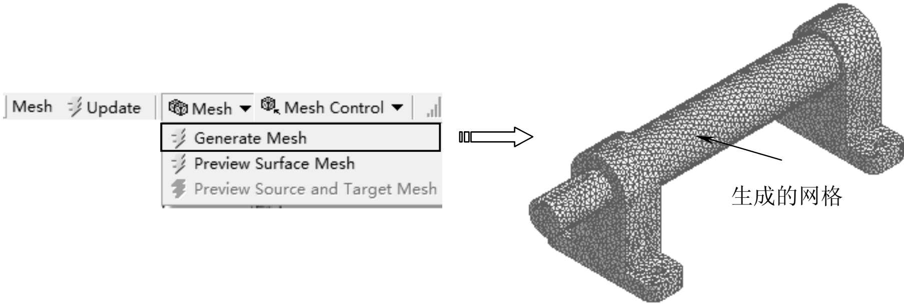


图 6-26　生成网格

6．施加静力载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support（固定约束）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择 4 个圆孔端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 6-27 所示。

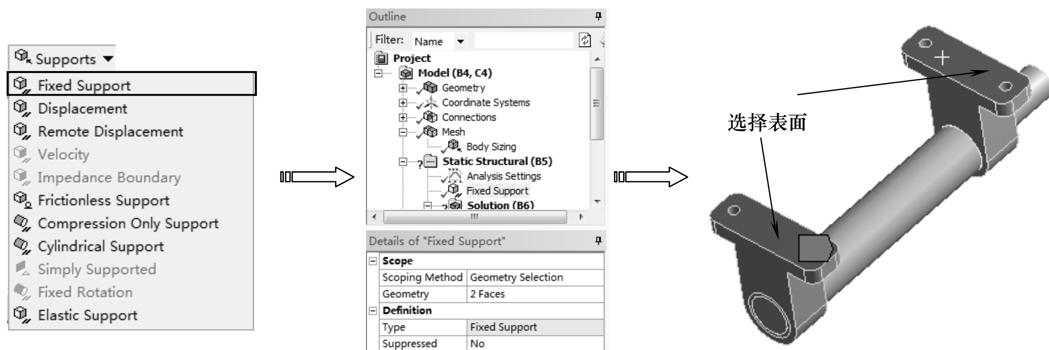


图 6-27　施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Moment】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Moment”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 6-28 所示端面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 10000Nmm，如图 6-28 所示。

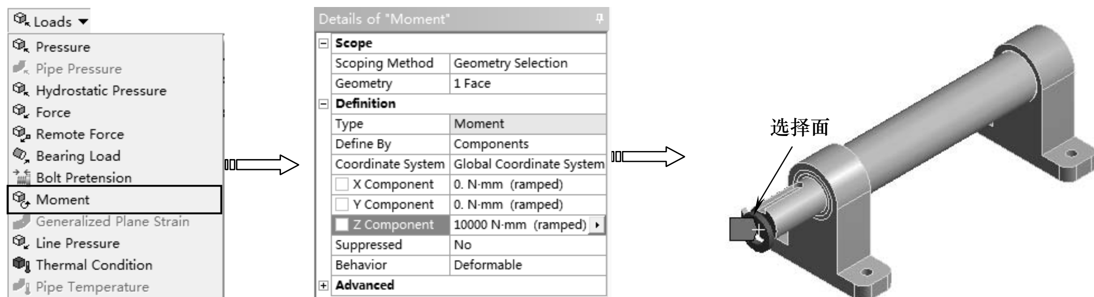


图 6-28　施加力矩

7．设置静力学分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 6-29 所示。

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 6-30 所示。

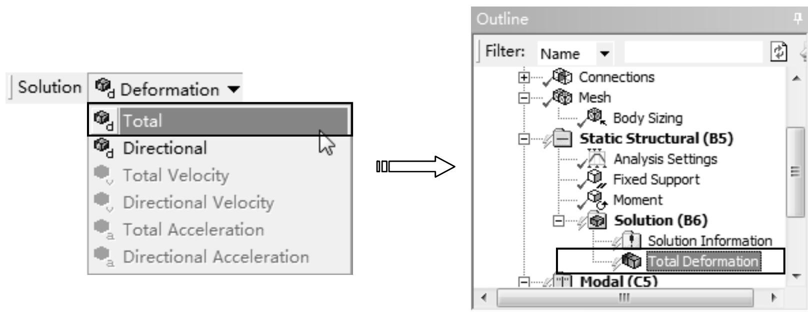


图 6-29　添加变形求解项

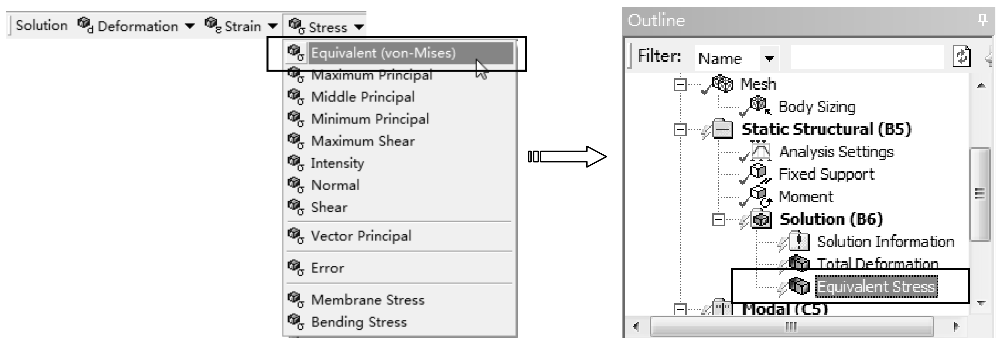


图 6-30　添加应力求解项

8．求解静力学并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 6-31 所示。

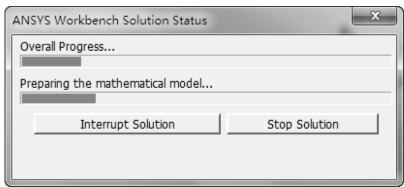
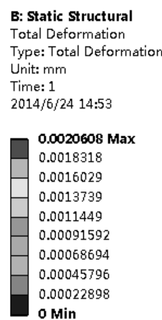


图 6-31　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图，如图 6-32 所示。

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图，如图 6-33 所示。



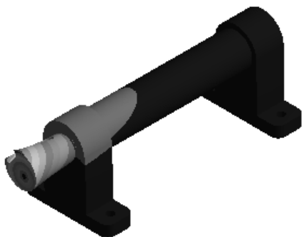
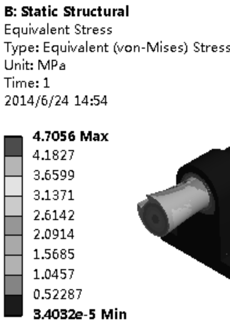


图 6-32　变形云图



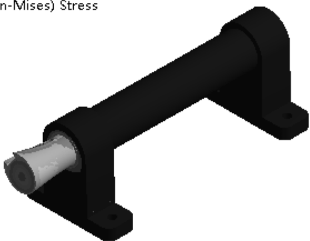


图 6-33　应力云图

9．设置模态分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（C5）】节点下的【Analysis Settings】，设置【Detail of“Analysis Settings”】中的【Max Modals to Find】为 6，求解前 6 阶模态，如图 6-34 所示。

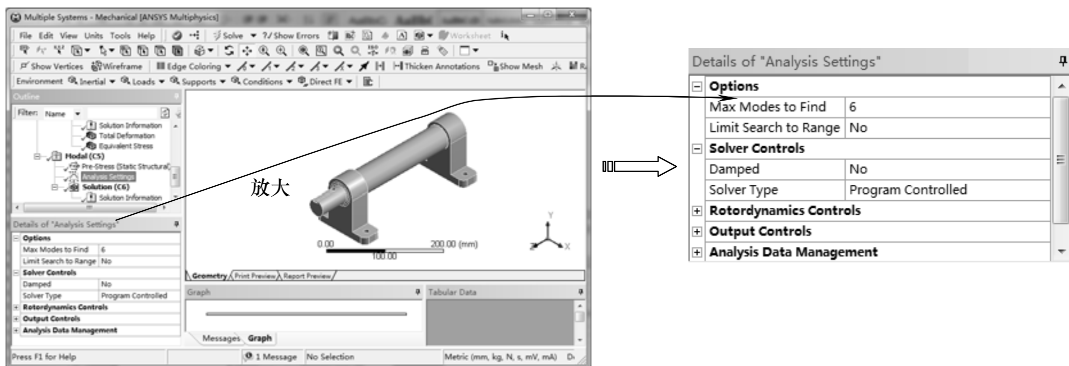


图 6-34　设置模态求解参数

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 6-35 所示。

3）同理，插入其他 5 个模态求解结果，如图 6-36 所示。

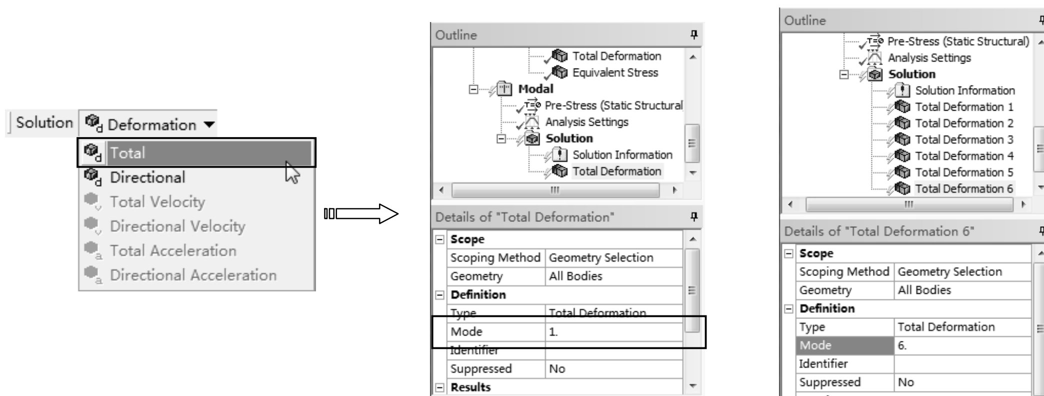


图 6-35　设置求解模态变形　　　　图 6-36　插入模态求解结果

10．模态分析求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 6-37 所示。

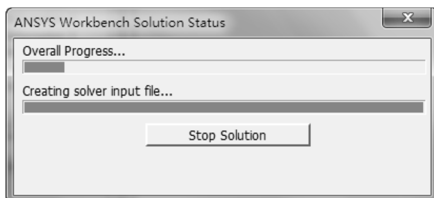


图 6-37　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在图形窗口显示出一阶振型。

3）采用相同的方法可以观察其他的各阶模态的分析结果，如图 6-38 所示。

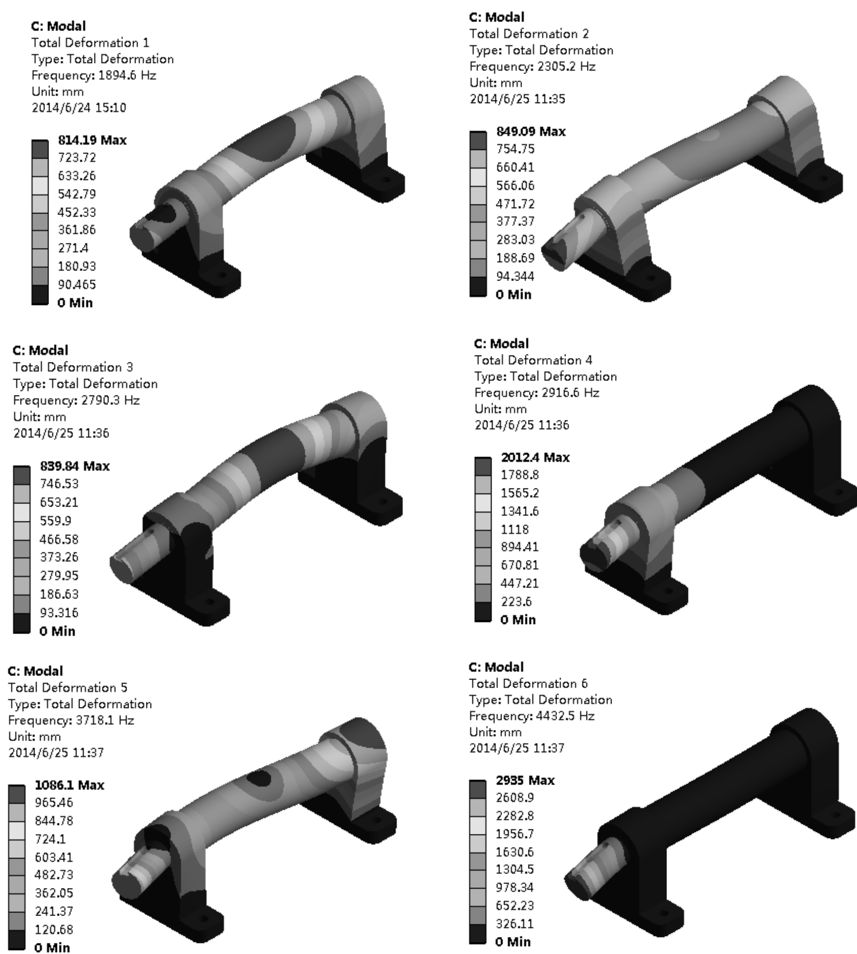
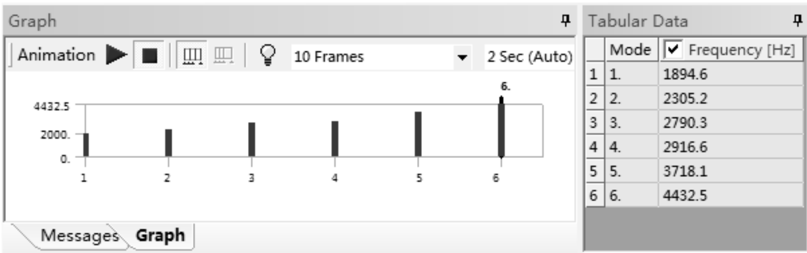


图 6-38　各阶模态振型

4）在 Mechanical 界面的右下方可以观察到模型的固有频率，如图 6-39 所示。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	1894.6
2	2.	2305.2
3	3.	2790.3
4	4.	2916.6
5	5.	3718.1
6	6.	4432.5

图 6-39　模型的固有频率

11．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

6.2.4　实例总结

本节以轴和轴座为例讲解了 ANSYS Workbench 的模态有限元分析的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意以下几点：

1）ANSYS Workbench 模态分析的操作步骤是：启动 Workbench→建立分析项目→建立几何模型→添加材料库→添加模型材料属性→划分网格→设置模态分析→设置求解项→求解→结果后处理等。

2）要进行预应力模态分析首先要进行静态分析，然后将结果传递到模态分析中；如果不进行预应力分析，则可以不进行静态分析，直接进行模态分析即可。

6.3　实例 2——压榨机架的谐响应分析

6.3.1　实例说明

本例中通过压榨机架进行谐响应分析，底部 4 个端面固定，上表面施加载荷幅值 F_x=100N，F_y=500N，F_z=100N，相位角为 0°，试分析其谐响应下的最大变形和应力，如图 6-40 所示。

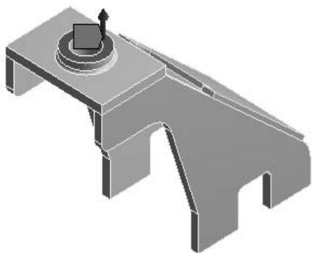


图 6-40　压榨机架

6.3.2　分析思路

本例为了简化模型创建过程，采用 SolidWorks 软件构建模型，然后导入到 Workbench 中进行分析。对于谐响应分析采用模态叠加法完成，因此需要首先进行模态分析获得系统的固有频率，然后通过选择谐响应分析获得频率响应曲线，找到系统的共振点，最后求解共振频率下的应力和位移。

6.3.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 6-41 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 6-42 所示。

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Modal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 6-43 所示。

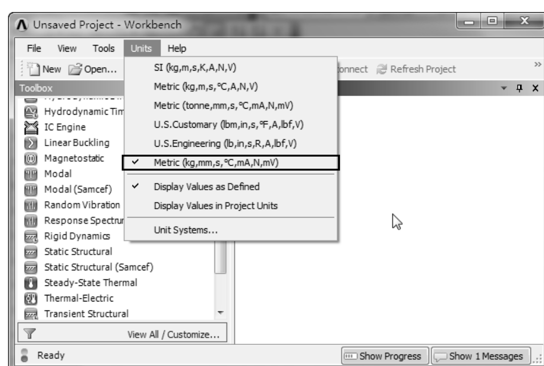


图 6-41 设置分析单位

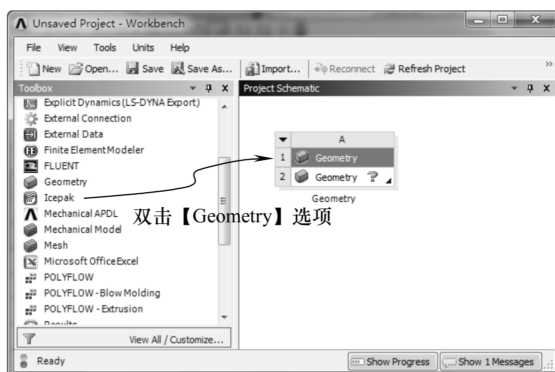


图 6-42 创建分析项目 A

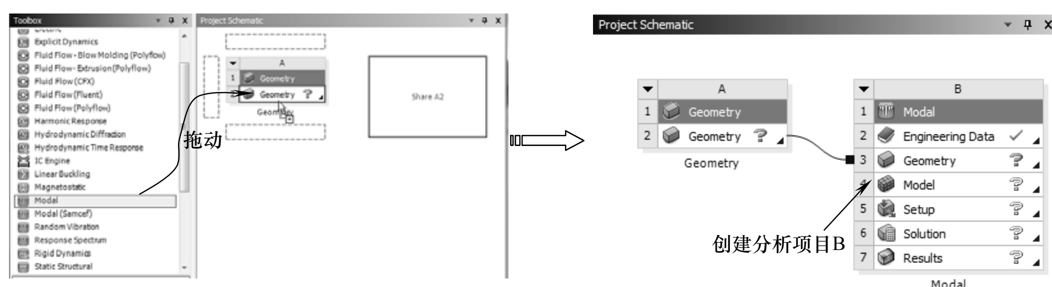


图 6-43 创建分析项目 B

注意：在进行谐响应分析前进行模态分析，虽然在谐分析中不要求进行模态分析，但这样做可更好地了解结构的固有频率。

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Harmonic Response】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 6-44 所示。

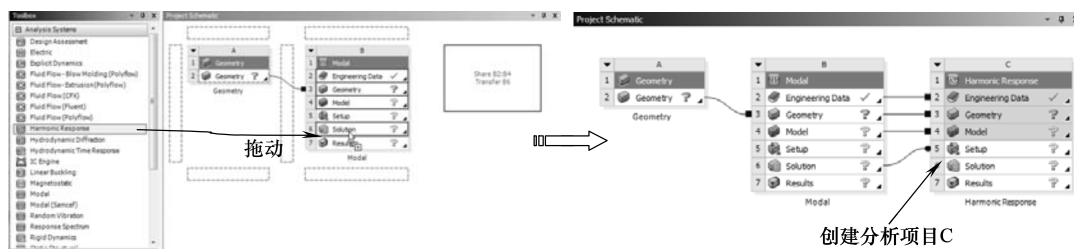


图 6-44 创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 6-45 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter06\uncompleted\Press.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 6-46 所示。

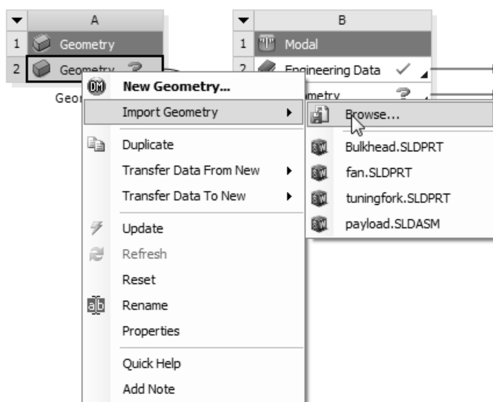


图 6-45　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

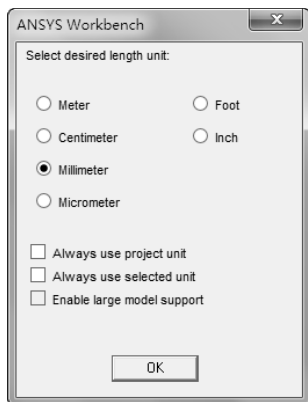


图 6-46　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 6-47 所示。

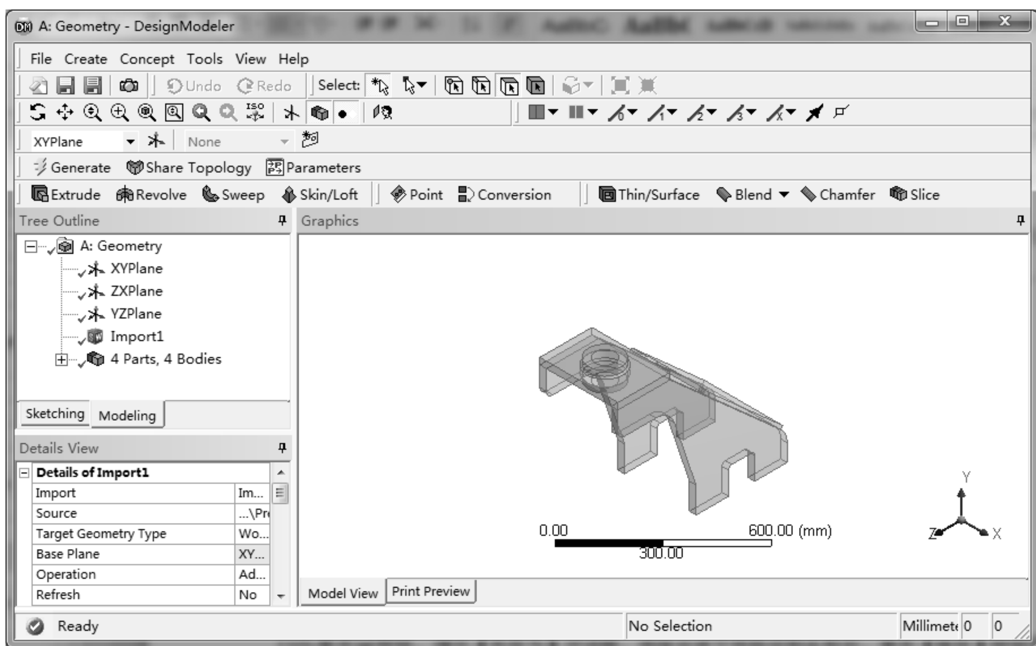


图 6-47　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击💾按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench

系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 10mm，如图 6-48 所示。

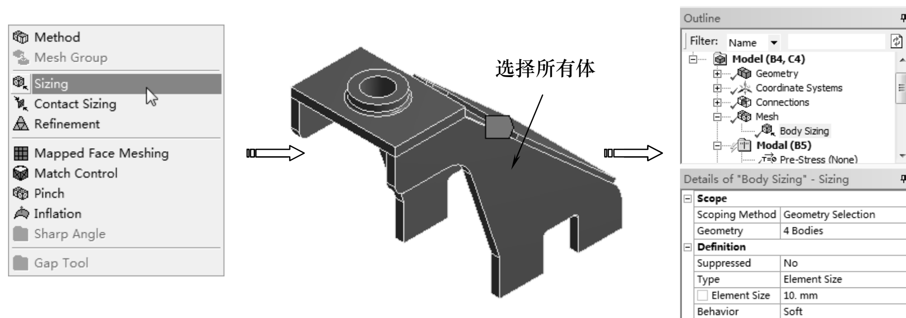


图 6-48　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 6-49 所示。

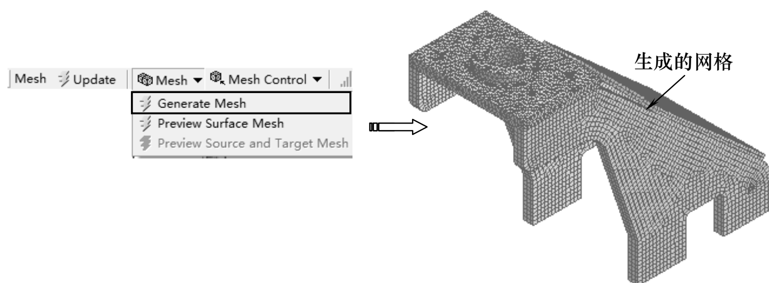


图 6-49　生成网格

6．施加模态分析载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support（固定约束）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping

Method】项，选择 4 个端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 6-50 所示。

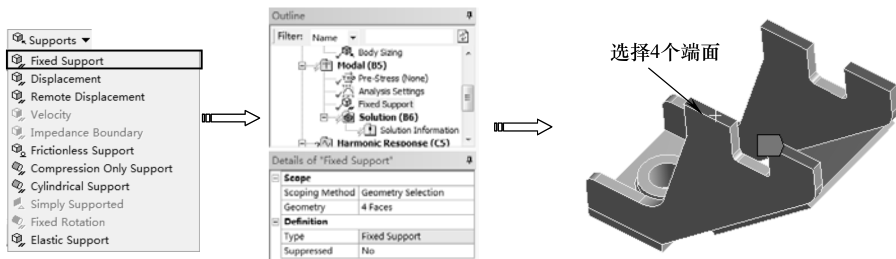


图 6-50　施加固定约束

7．设置模态分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（B5）】节点下的【Analysis Settings】，设置【Detail of“Analysis Settings”】中的【Max Modals to Find】为 6，求解前 6 阶模态，如图 6-51 所示。

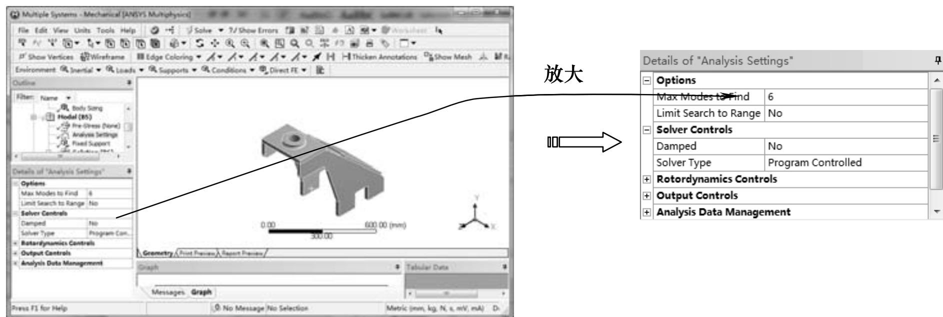


图 6-51　设置模态求解参数

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 6-52 所示。

3）同理，插入其他 5 个模态求解结果，如图 6-53 所示。

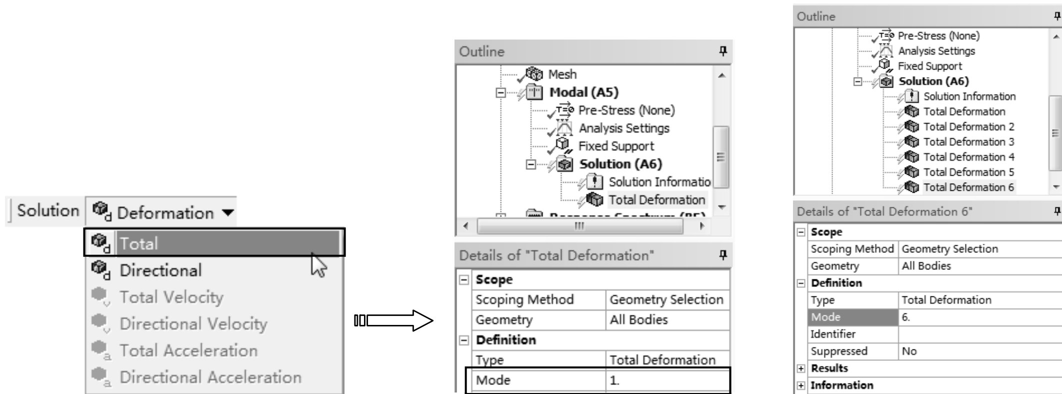


图 6-52　设置求解模态变形　　　　图 6-53　插入模态求解结果

8．模态求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。

求解完成后进度条自动消失，如图 6-54 所示。

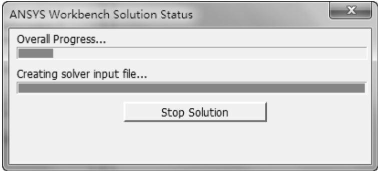


图 6-54　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在图形窗口显示出一阶振型。采用相同的方法可以观察其他各阶模态的分析结果，如图 6-55 所示。

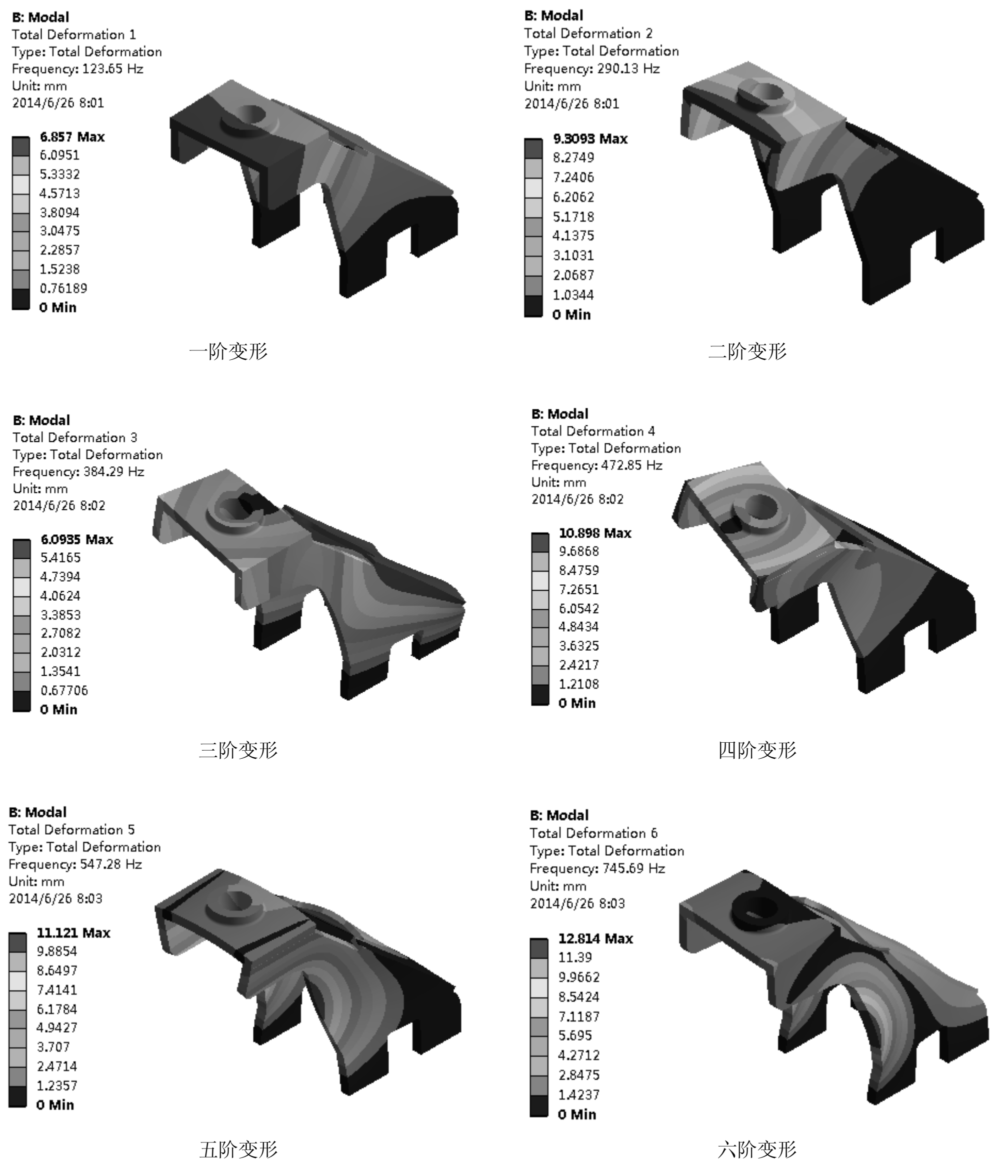


图 6-55　各阶模态振型

3）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在 Mechanical 界面的右下方可以观察到模型的固有频率，如图 6-56 所示。

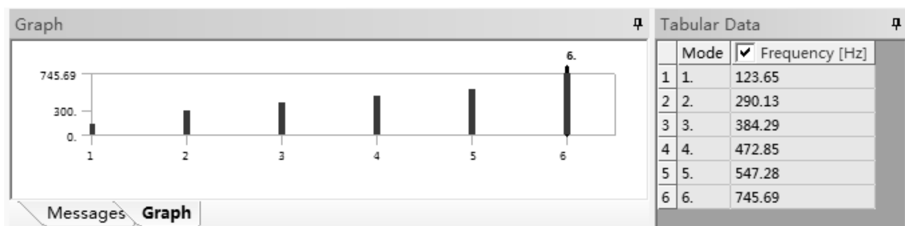


图 6-56　模型的固有频率

9．施加谐响应分析载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Harmonic Response（C5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 6-57 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Define By】下拉列表中选择 Components，在【X Component】和【Z Component】文本框中输入 100，在【Y Component】文本框中输入 500，在【Phase Angle】文本框中输入 0，如图 6-57 所示。

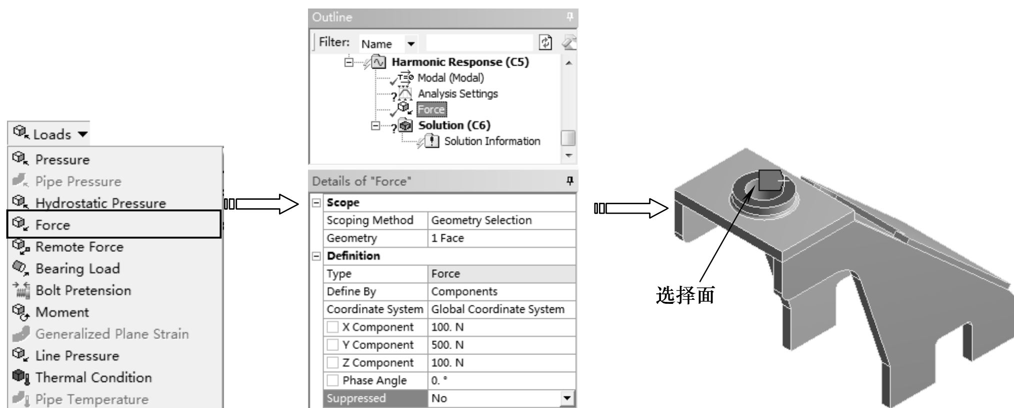


图 6-57　施加力

10．设置谐响应分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Harmonic Response（C5）】节点下的【Analysis Settings】，将【Detail of “Analysis Settings”】中的【Range Maximum】设置为 1000，取 100 个频率点结果，输入【Solution Intervals】为 100，如图 6-58 所示。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution】节点，出现【Solution】工具栏。

3）求解应力响应。单击【Solution】工具栏上的【Frequency Response】|【Stress】命令，此时在分析树中插入【Frequency Response】项，按<F2>键，将其重新命名为 Frequency Response Stress，选择如图 6-59 所示的表面，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 6-59 所示。

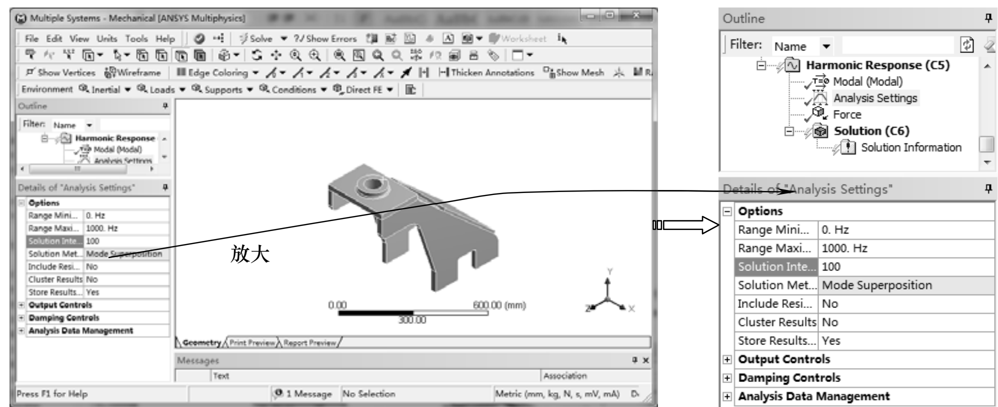


图 6-58　设置谐响应求解参数

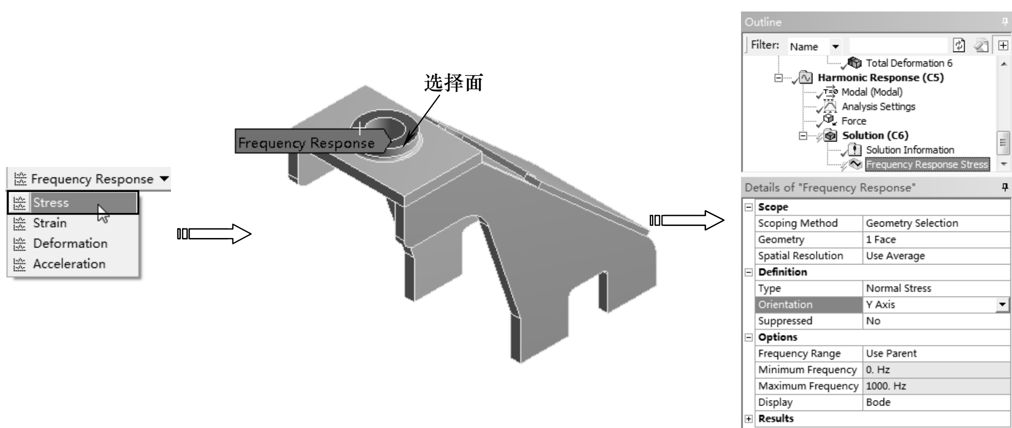


图 6-59　添加应力响应求解项

4）求解变形响应。单击【Solution】工具栏上的【Frequency Response】|【Deformation】命令，此时在分析树中插入【Frequency Response】项，按<F2>键，将其重新命名为 Frequency Response Deformation，选择如图 6-60 所示的表面，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 6-60 所示。

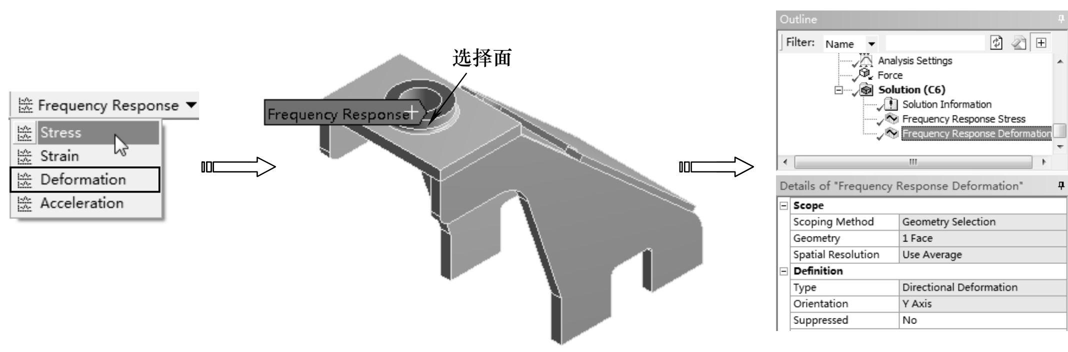


图 6-60　添加变形响应求解项

11．谐响应求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 6-61 所示。

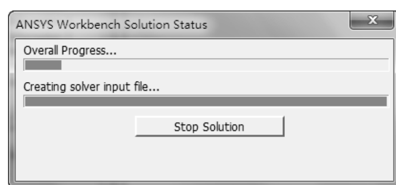


图 6-61　求解进度条

2）应力响应结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Frequency Response Stress】项 Frequency Response Stress，可以观察到谐响应应力分析结果，如图 6-62 所示。上图为幅值频谱，下图为相位频谱，从图可看到有两个谐振动频率，Y 方向 1 阶频率为 290.13Hz，2 阶频率为 547.28Hz，与模态分析结果相同。

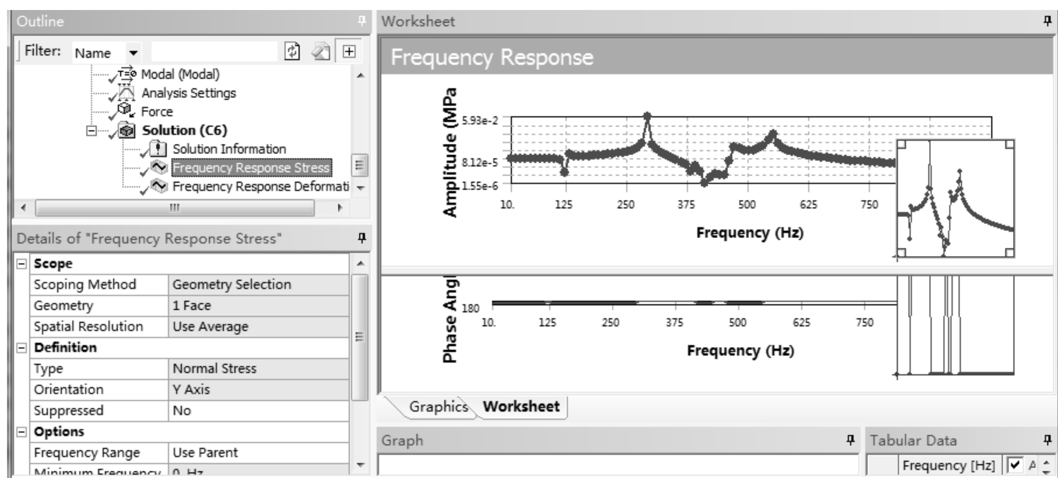


图 6-62　应力频率响应

3）变形响应结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Frequency Response Deformation】项 Frequency Response Deformation，可以观察到谐响应变形分析结果，如图 6-63 所示。上图为幅值频谱，下图为相位频谱。

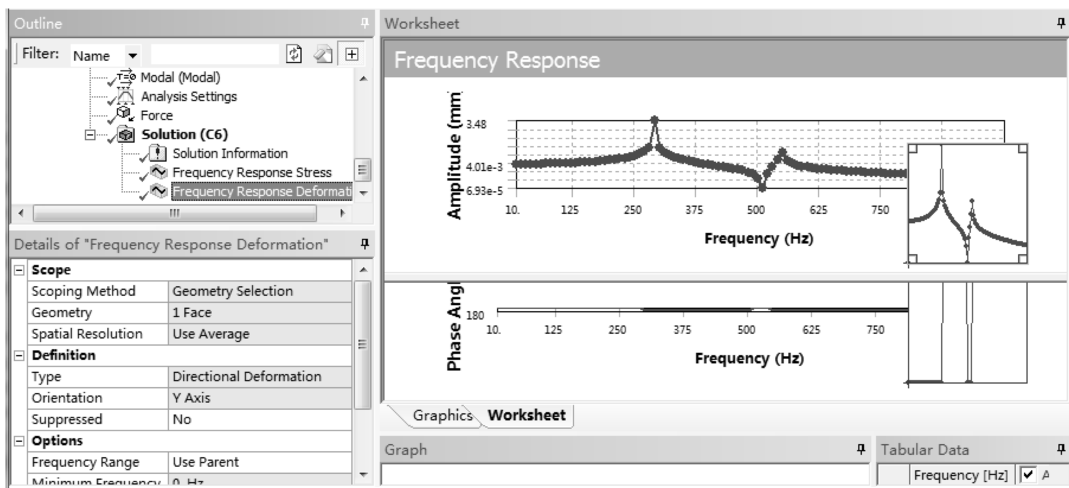


图 6-63　变形频率响应

4）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，在详细设置窗口中设置【Frequency】为 290.13，如图 6-64 所示。

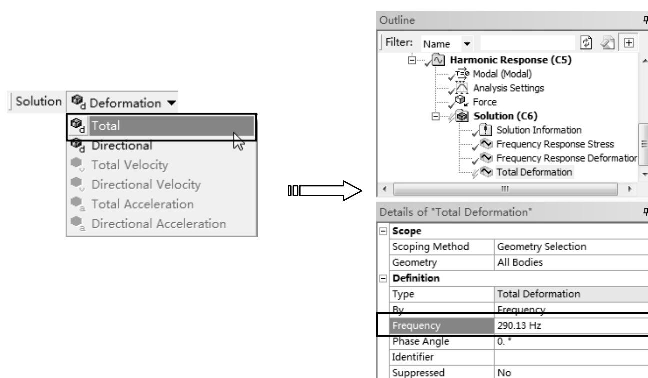


图 6-64　添加变形求解项

5）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，在详细设置窗口中设置【Frequency】为 290.13，如图 6-65 所示。

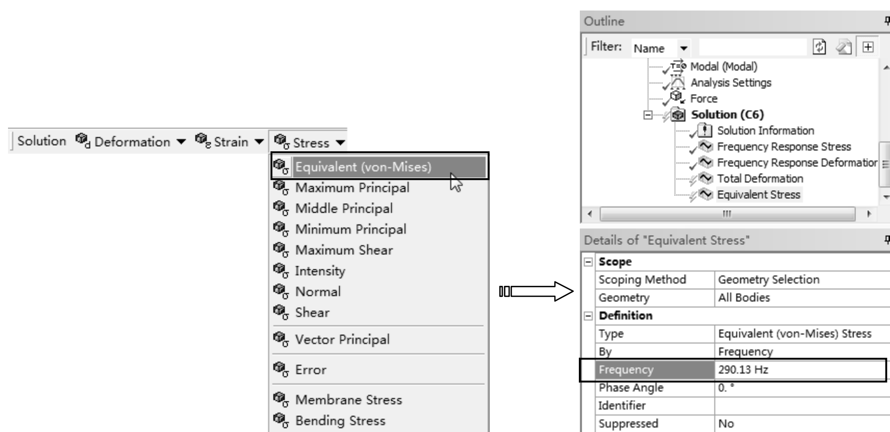


图 6-65　添加应力求解项

6）求解结果。在分析树中刚创建的选项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，弹出进度条，表示正在求解，当求解完成后进度条消失。

7）应变云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出应变云图，如图 6-66 所示。

8）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图，如图 6-67 所示。

12．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

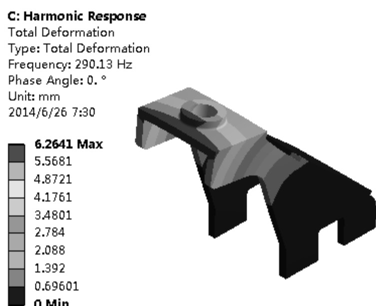


图 6-66　变形云图

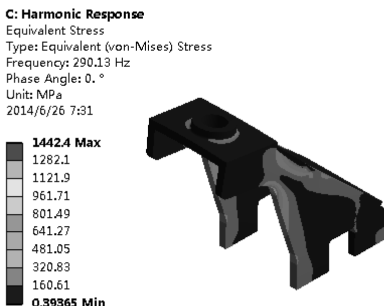


图 6-67　应力云图

6.3.4　实例总结

本节以压榨机架为例讲解了 ANSYS Workbench 的谐响应有限元分析的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：设置求解频率范围和时间间隔时，推荐模态计算范围为最大谐响应分析频率的 1.5 倍。

6.4　实例 3——桁架的响应谱分析

6.4.1　实例说明

如图 6-68 所示桁架，截面为 50mm×50mm×4mm 的矩形管，下面 4 点固定，试求在给定加速度频谱下的响应。



图 6-68　桁架

6.4.2　分析思路

本例为了简化模型创建过程，采用 SolidWorks 软件构建模型，然后导入到 Workbench 中进行分析。对于响应谱分析，一般首先进行模态分析获得系统的固有频率，然后通过选择响应谱分析获得响应位移或应力曲线。

6.4.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 6-69 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 6-70 所示。

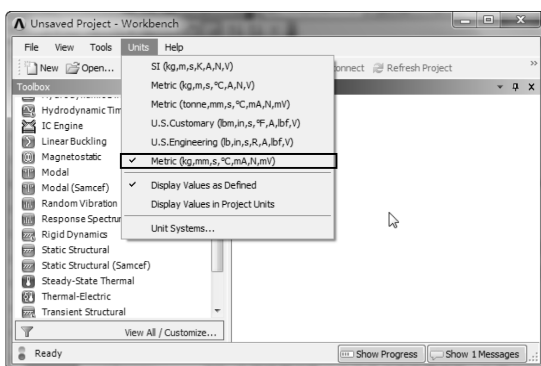


图 6-69　设置分析单位

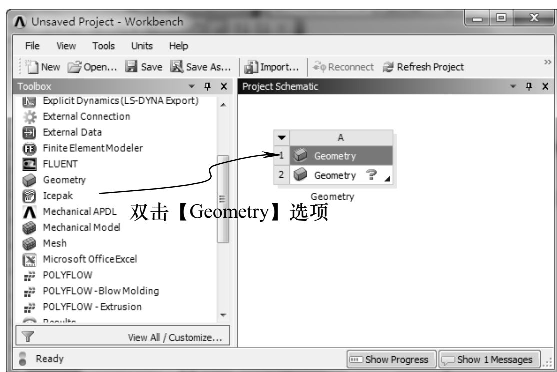


图 6-70　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Modal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 6-71 所示。

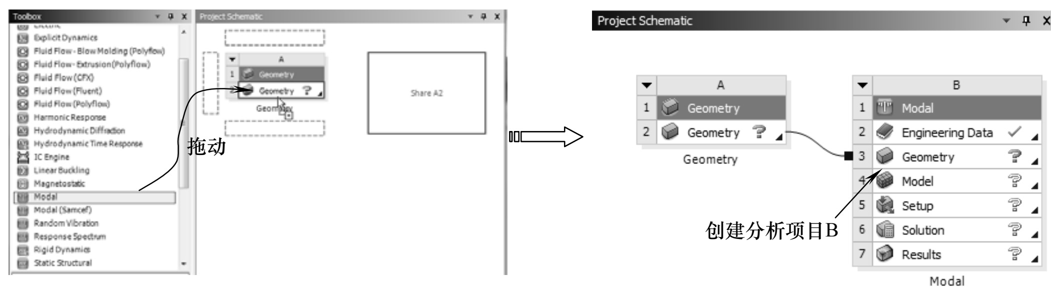


图 6-71　创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Response Spectrum】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 6-72 所示。

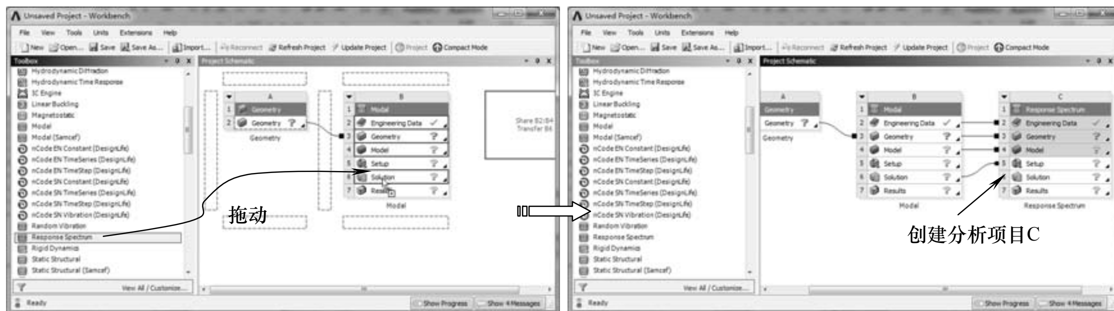


图 6-72　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 6-73 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter06\6.4\

uncompleted\hangjia.agdb”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

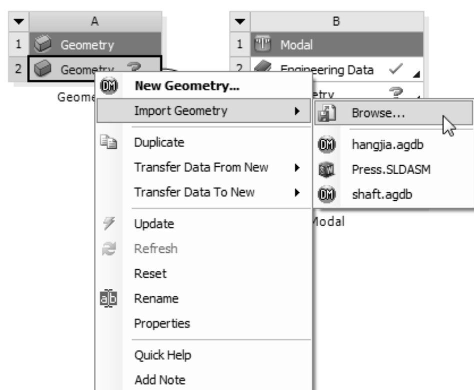


图 6-73　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 6-74 所示。

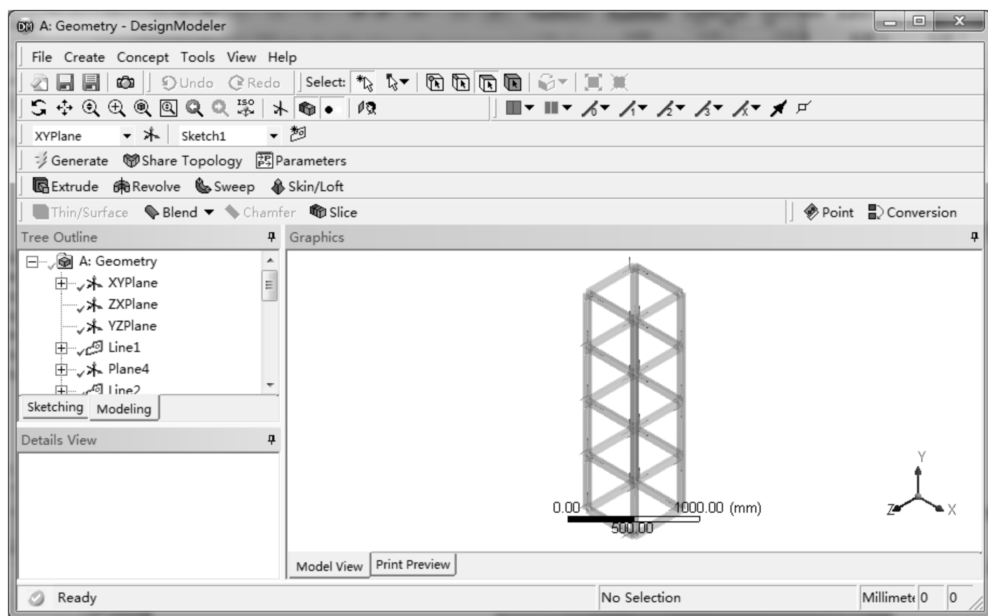


图 6-74　DesignModeler 界面

4）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

5）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench

系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 10mm，如图 6-75 所示。

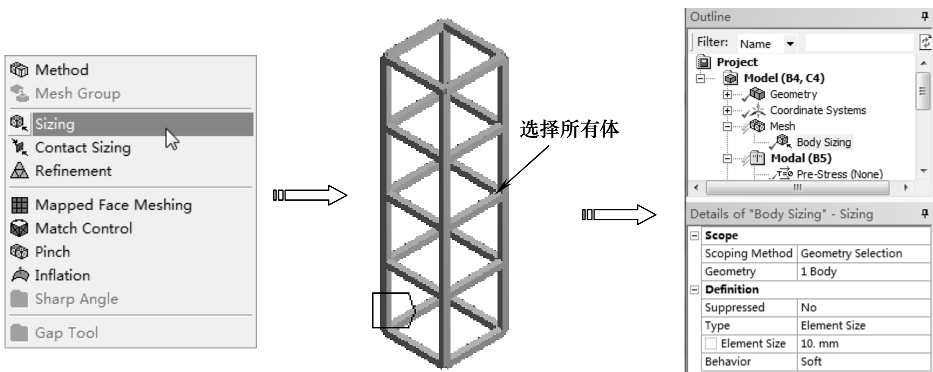


图 6-75　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 6-76 所示。

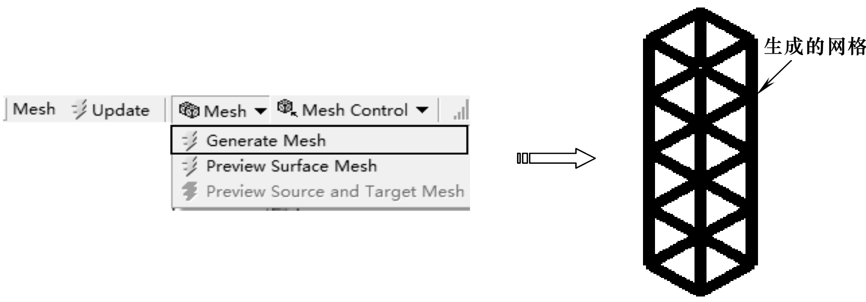


图 6-76　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（A5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工

具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Point（选择点）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 6-77 所示点。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 6-77 所示。

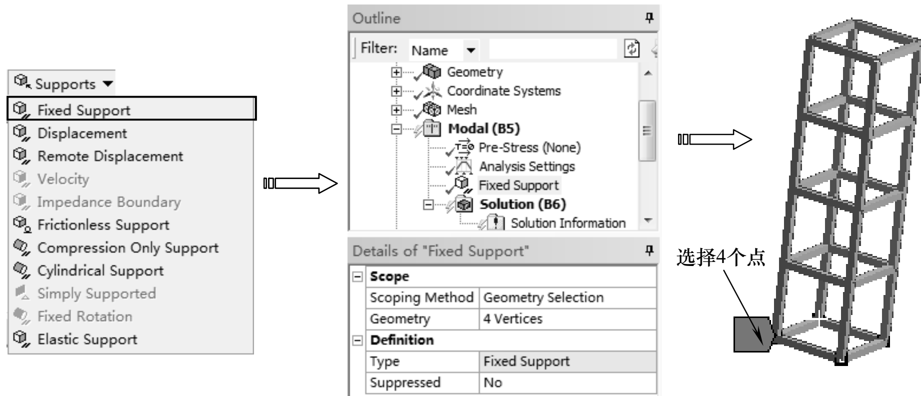


图 6-77　施加固定约束

注意：该固定约束也是输入基础激励的位置，还是数据采集的位置。

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（A5）】节点下的【Analysis Settings】，将【Detail of “Analysis Settings”】中的【Max Models to Find】设置为 6，求解前 6 阶模态，如图 6-78 所示。

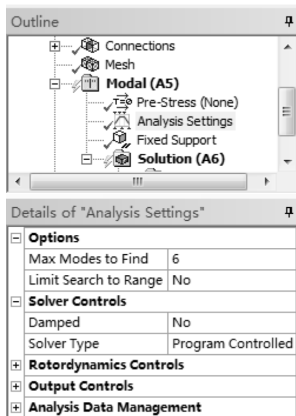


图 6-78　设置模态求解参数

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 6-79 所示。

3）同理，插入其他 5 个模态求解结果，如图 6-80 所示。

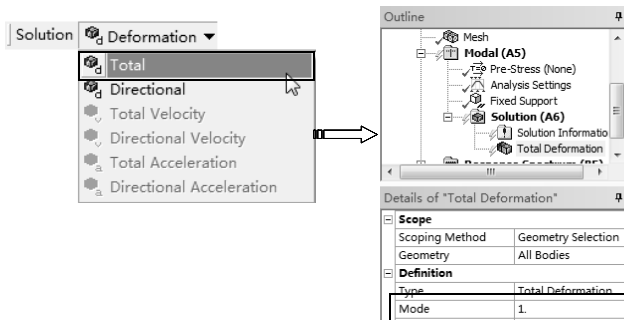


图 6-79　设置求解模态变形

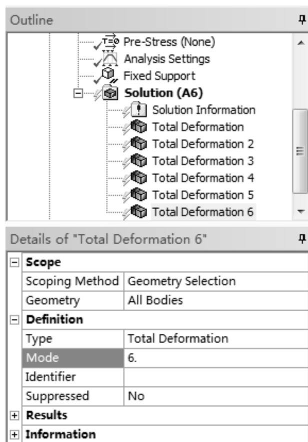


图 6-80　插入模态求解结果

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 6-81 所示。

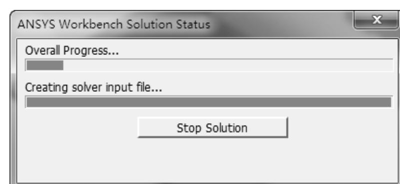


图 6-81　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在图形窗口显示出一阶振型。采用相同的方法可以观察其他各阶模态的分析结果，如图 6-82 所示。

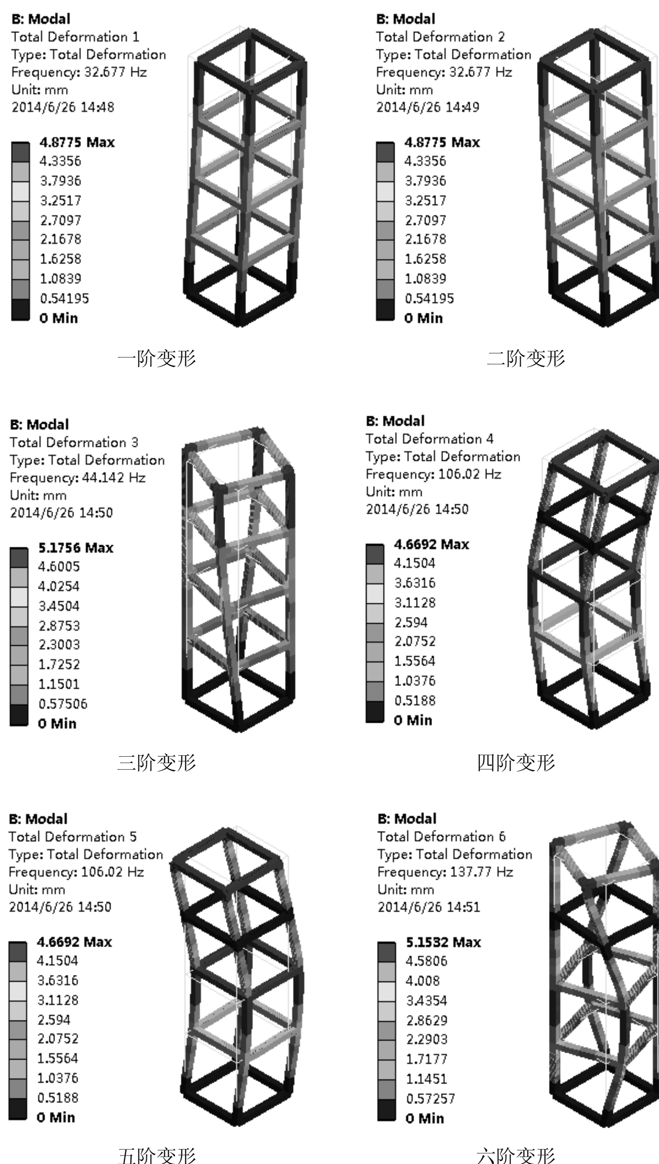


图 6-82　各阶模态振型

3）在 Mechanical 界面的右下方可以观察到模型的固有频率，如图 6-83 所示。

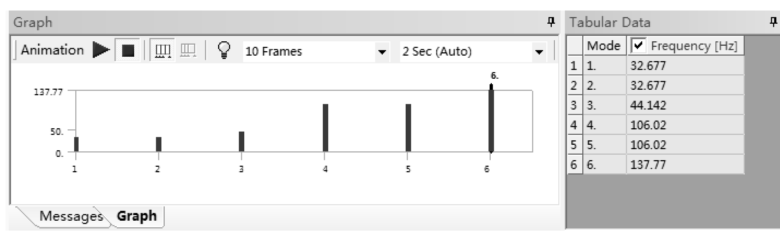


图 6-83　模型的固有频率

9．添加加速度激励谱（启动响应谱分析）

1）在【Outline（分析树）】中选择【Response Spectrum（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【RS Base Excitation】|【RS Acceleration】命令，在【Details of “RS Acceleration”】列表中选择【Scope】选项下的【Boundary Condition】项为 All BC Supports，在【Definition】选项下的【Load Data】中选择 Tabular Data，然后在右侧的【Tabular Data】列表中输入相关数据，如图 6-84 所示。

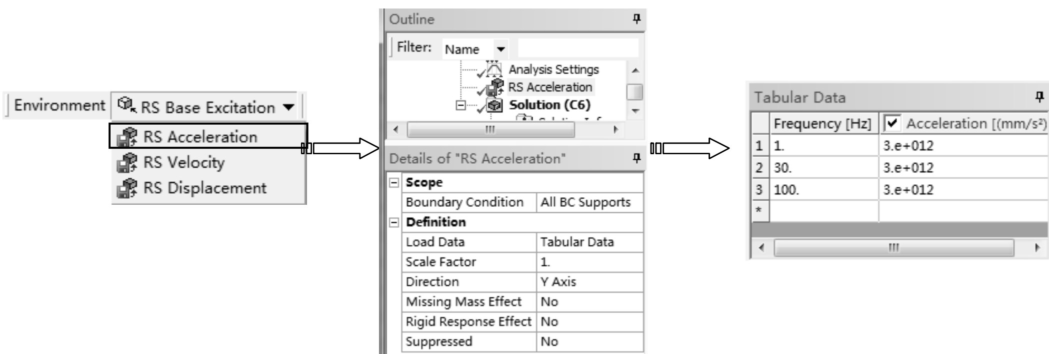


图 6-84　施加加速度激励谱

10．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional】命令，此时在分析树中插入【Directional Deformation】项，在详细设置窗口选择【Orientation】为 Y Axis，如图 6-85 所示。

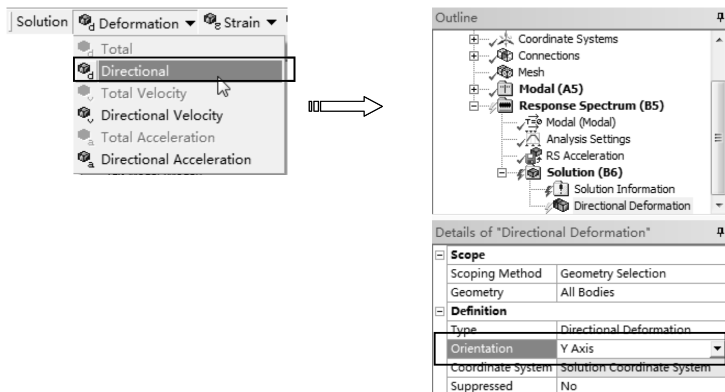


图 6-85　添加变形求解项

11．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 6-86 所示。

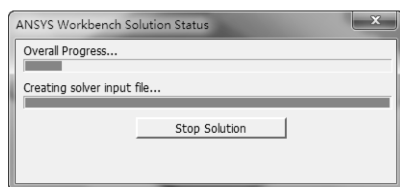


图 6-86　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Deformation】项 Directional Deformation，在图形窗口显示出变形云图，如图 6-87 所示。

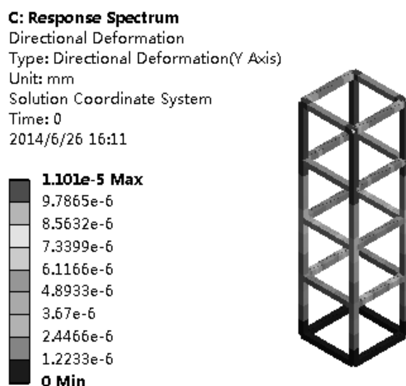


图 6-87　变形云图

12．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

6.4.4　实例总结

本节以桁架为例讲解了 ANSYS Workbench 的响应谱分析的具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：输入的响应谱曲线来自实验的测试数据，可在需要的地方加装加速度计，并执行相关实验得到。当生成响应谱时，最好使用代表激励结构的真实载荷条件的实验数据，如果没有数据可参考，可参照标准 MIL-STD-810F，对一般的载荷条件采用样例曲线。

6.5　本章小结

本章通过实例讲解了 ANSYS Workbench 软件的结构动力学分析技术，包括模态分析、谐响应分析、响应谱分析等，具体包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。读者通过学习，将能掌握 ANSYS Workbench 结构动力学分析模块的操作方法和实际应用。

第 7 章　ANSYS 14.5 Workbench 疲劳分析实例

本章通过典型案例对疲劳分析的一般分析方法进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。

7.1　疲劳分析概述

结构的疲劳破坏是其主要的失效形式，结构的疲劳强度和疲劳寿命是进行结构抗疲劳设计、强度校核的重要内容。ANSYS Workbench 中疲劳分析是在线性静力分析之后，通过添加疲劳工具来实现的。

7.1.1　疲劳分析基础

当材料或结构受到多次重复变化的载荷作用后，在应力值虽然始终没有超过材料的强度极限，甚至比弹性极限还低的情况下就可能发生破坏。这种在交变载荷持续作用下材料或结构的破坏现象，叫做疲劳破坏。应力波动的每个周期都会或多或少损坏物体，在循环一定数量的周期之后，物体会变得越来越衰弱以致最终破坏。绝大多数机器零件都是在交变载荷下工作，这些零部件疲劳失效是主要的破坏形式。例如，转轴有 50%或 90%都是疲劳破坏。其他如连杆、齿轮的轮点、涡轮机的叶片，轧钢机的机架，曲轴，连接螺栓、弹簧压力容器、焊接结构等许多机器零部件，疲劳破坏占绝大部分。因此，抗疲劳设计广泛应用于各种专业机械设计中，对于航空、航天、原子能、汽车、拖拉机、动力机械、化工机械、重型机械等抗疲劳设计更为重要。

疲劳失效有 3 个阶段：

（1）阶段 1　材料中形成一处或多处裂纹，材料的任何位置都可能形成裂纹，但通常发生的位置是边界面，因为这里有更高的应力波动。裂纹产生的原因很多，材料细微结构的缺陷以及加工或处理引起的表面刮擦都是其中的原因。

（2）阶段 2　部分或所有裂纹因继续应用载荷而增大。

（3）阶段 3　设计为容忍所应用载荷的能力继续恶化，直到失效发生。

由于模型的表面暴露在各种不同环境中（湿气等），通常也是应力最高的部位，这些部位也是最容易形成并开始扩展的地方，因此加强模型表面可以延长模型在疲劳下的寿命。

ANSYS Workbench 疲劳分析是在线性静力分析基础上，通过设计仿真自动执行的。对疲劳工具的添加，无论在求解之前还是之后，都没有关系，因为疲劳计算并不依赖应力分析计算。尽管疲劳与循环或重复载荷有关，但使用的结果却基于线性静力分析，而不是谐分析。在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Static Structural】上按住鼠标左键，拖动到项目管理区，即可创建静力学分析项目。按照分析项目从上到下的顺序执行

静力分析，最后插入疲劳工具即可获得疲劳分析结果，如图 7-1 所示。

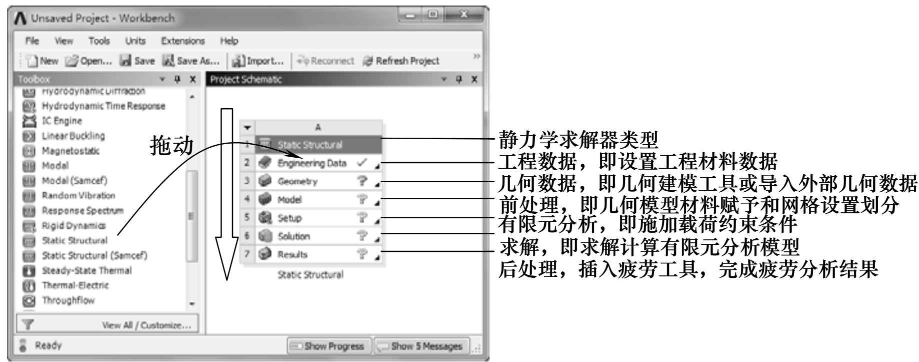


图 7-1　创建静力学分析项目

在疲劳分析中需要注意的是：由于有线性静力分析，所以需要用到杨氏模量和泊松比；如果有惯性载荷，则需要输入质量密度；如果有热载荷，则需要输入热膨胀系数和热传导率；如果使用应力工具结果（Stress Tool result），那么就需要输入应力极限数据，而且这个数据也是用于平均应力修正理论疲劳分析。疲劳模块还需要使用到在工程数据分支下的材料特性中的 *S-N* 曲线数据，*S-N* 曲线数据是在材料特性分支条下的“交变应力与循环”（Alternating Stress vs. Cycles）选项中输入的。如果 *S-N* 曲线材料数据可用于不同的平均应力或应力比下的情况，那么多重 *S-N* 曲线也可以输入到程序中。

7.1.2　疲劳分析术语

（1）高、低疲劳周期　根据应力幅度和预期的导致破坏所需的循环次数，可将疲劳分为以下两类：

- ✧ 高周疲劳：交变应力的大小适中，在材料中几乎不产生或只产生很小的塑性变形。处于这种载荷下的零件，在疲劳失效发生前可承受最高循环次数超过 10^4 次时为高周疲劳，由于应力通常比材料的极限强度低，故称为应力疲劳（Stress-based）。
- ✧ 低周疲劳：低周疲劳在循环次数相对较低时发生，循环次数不超过 10^4 次，低周疲劳常常伴随材料的塑性变形，故又称为应变疲劳（Strain-based）。

（2）疲劳强度　在给定周期数下，疲劳失效发生时的应力。

（3）交变载荷类型　当交变载荷引起的机械结构最大和最小应力水平均恒定时，称为恒定振幅载荷。这是载荷的最简单形式，否则，则为变化振幅或非恒定振幅载荷。

（4）应力循环　应力重复出现一次称为一个应力循环，重复出现的次数称为循环数。完成一个应力循环所需要的时间称为一个周期，如图 7-2 所示。

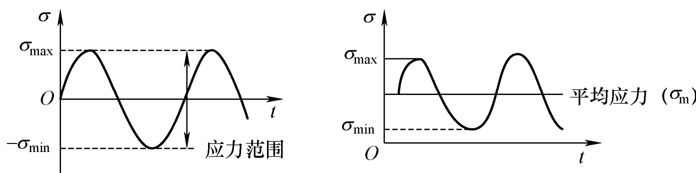


图 7-2　应力循环

（5）平均应力和应力幅　结构在恒定振幅、比例载荷作用下的应力变化情况，$\sigma_{\min}$ 和 $\sigma_{\max}$ 分别为最小和最大应力值，则平均应力 σ_m 为

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\min} + \sigma_{\max})$$

应力幅 σ_a

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$$

（6）循环特征（应力比）将交变应力的最小应力和最大应力的比值称为循环特性或应力比，用 r 表示，即

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

当交变应力的最大应力和最小应力大小相等且方向相反时，称为对称循环交变应力，相对应的载荷为对称循环载荷，这时 r=−1，如图 7−3 所示。

当交变应力在零到某一最大值间循环变化时，称为脉动循环交变应力，相对应的载荷称为脉动循环载荷，此时 r=0，如图 7−4 所示。

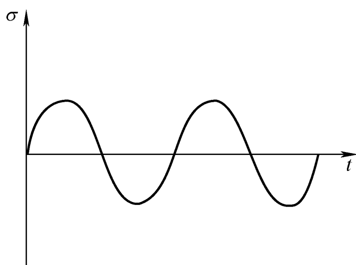


图 7−3　对称循环变应力

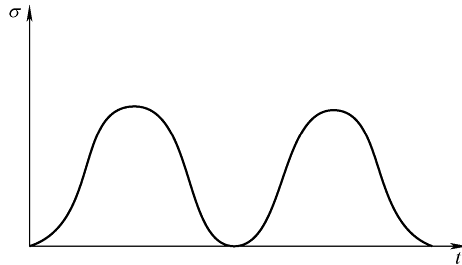


图 7−4　不对称循环变应力

（7）应力-寿命曲线　结构在交变应力作用下，要经过一定次数的循环，才会发生疲劳破坏，而且在同一循环特征下，交变应力越大，经历的循环次数越少，交变应力 σ 与循环次数 N 之间的关系称为应力-寿命曲线，即 S-N 曲线。

材料的 S-N 曲线定义为交替应力值与指定应力比率下失效所需的周期数。典型的 S-N 曲线如图 7−5 所示。Y 轴表示交替应力（S），X 轴表示循环数（N）。S-N 曲线是基于应力比率或平均应力的。可以定义多条具有不同材料应力比的 S-N 曲线，在定义多条材料的 S-N 曲线时，软件使用线性插值法提取数据。S-N 曲线是以平均疲劳生命或给定的失效概率为基础的。为材料创建 S-N 曲线需要多次测试，以在统计上区分交替应力、平均应力（或应力比率）和周期数。

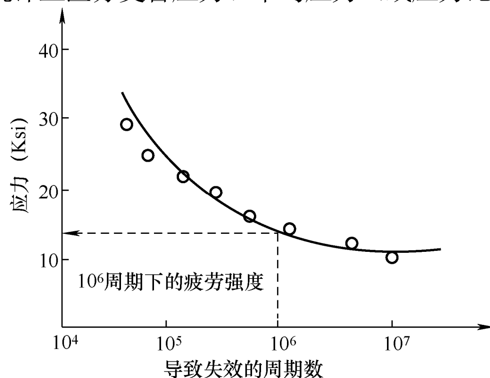


图 7−5　S-N 曲线

7.1.3 疲劳工具

利用疲劳工具可计算云图结果或曲线结果等疲劳结果。

单击【Solution】工具栏上的【Tool】|【Fatigue Tool】命令，如图 7-6 所示；在【Outline（分析树）】中插入【Fatigue Tool】，如图 7-7 所示。

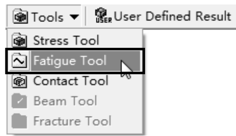


图 7-6 选择【Fatigue Tool】命令

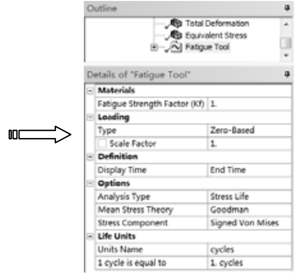


图 7-7 插入疲劳工具

（1）Materials Fatigue Strength Factor（疲劳强度因子）是指构件实际受力极限状态与构件充分受力极限状态的应力之比。常见的疲劳强度因子在考虑表面光洁度的情况下可从机械设计手册上查得。

（2）Loading Type 用于定义交替应力类型，包括以下选项。

- ✧ Zero-Based（基于零）：交替应力等于参考静态算例中相应的应力值的一半乘以比例因子，如图 7-8 所示。
- ✧ Fully Reverse（完全反转）：交替应力等于参考静态研究中相应的应力值乘以比例因子，应力各分量的最大和最小值大小相等，方向相反，如图 7-8 所示。
- ✧ Ratio（载荷比率）：交替应力正、负方向上等于参考静态研究中相应的应力值乘以比例因子，如图 7-8 所示。
- ✧ History Data（历史数据）：用于自定义数据输入交替应力。

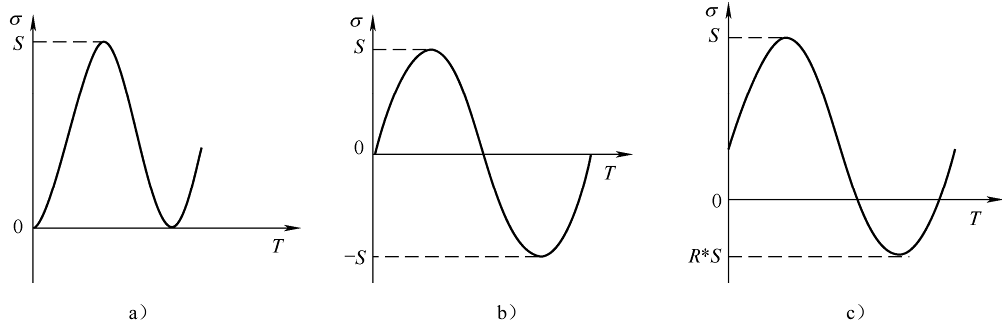


图 7-8 Type 类型

a）Zero-Based（基于零） b）Fully Reverse（完全反转） c）Ratio（载荷比率）

（3）Mean Stress Theory 应力周期的交替应力幅度计算为周期中应力范围的一半。由应力循环所导致的损坏量不但取决于交替应力，也取决于平均应力。其中，Goodman 理论适用于低韧性材料，对压缩平均应力没能做修正，Soderberg 理论比 Goodman 理论更保守，并且在有些情

况下可用于脆性材料，Gerber 理论能够对韧性材料的拉伸平均应力提供很好的拟合，但它不能正确地预测出压缩平均应力的有害影响。

利用【Fatigue Tool】工具可查看疲劳分析结果，包括以下类型，如图 7-9 所示。

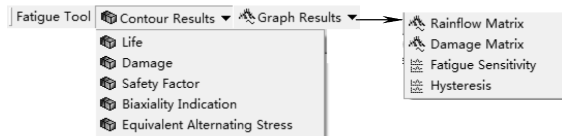


图 7-9　疲劳分析结果

✧ Life（寿命）：等值线显示由于疲劳作用直到失效的循环次数，如果交变应力比 *S-N* 曲线中定义的最低交变应力低，则使用该寿命（循环次数）。
✧ Damage（损伤）：设计寿命与可用寿命的比值，设计寿命在详细设置窗口的【Details View】中定义。
✧ Safety Factor（安全系数）：安全系数等值线是关于一个在给定设计寿命下的失效，设计寿命值在详细设置窗口的【Details View】中输入，最大安全系数（SF）值是 15。
✧ Biaxiality Indication（双轴指示）：应力双轴等值线有助于确定局部的应力状态，双轴指示（Biaxiality Indication）是较小与较大主应力的比值（对于主应力接近 0 的被忽略）。因此，单轴应力局部区域比值为 0，纯剪切的为–1，双轴的为 1。
✧ Equivalent Alternating Stress（等效交变应力）：等值线在模型上绘出了部件的等效交变应力，它是基于所选择应力类型，在考虑了载荷类型和平均应力影响后，用于询问（Query）*S-N* 曲线的应力。
✧ Fatigue Sensitivity（疲劳敏感性）：一个疲劳敏感曲线图显示出部件的寿命、损伤或安全系数在临界区域随载荷的变化而变化，能够输入载荷变化的极限（包括负比率）。

7.2　实例 1——篮圈的疲劳分析

7.2.1　实例说明

本例中通过篮圈来分析端部表面作用 0～1000N 载荷，背面固定在篮板上时，篮圈在经受 10000 次这样载荷周期的疲劳寿命，如图 7-10 所示。

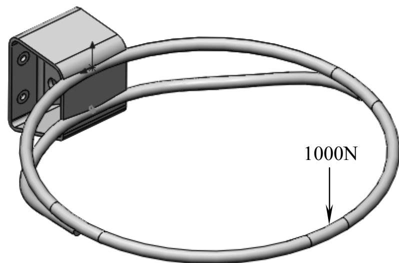


图 7-10　篮圈模型

7.2.2 分析思路

本例在采用静力学分析的基础上，以添加疲劳工具的方式来进行篮圈疲劳分析，疲劳工具添加在静力学求解之后。因为疲劳分析需要 *S-N* 曲线数据，因此在工程数据中手工添加分析材料的 *S-N* 曲线。

7.2.3 具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 7-11 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 7-12 所示。

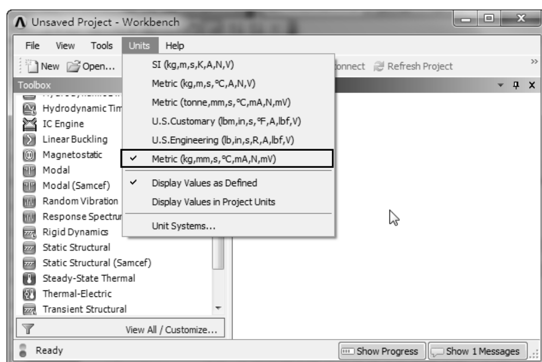


图 7-11 设置分析单位

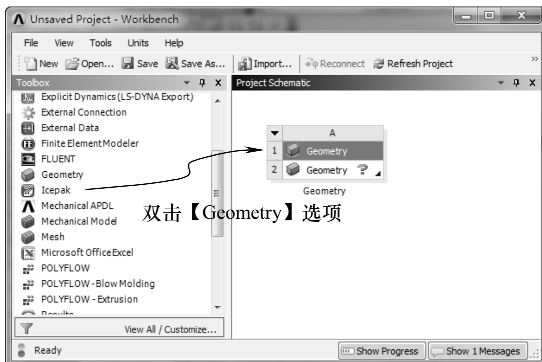


图 7-12 创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 7-13 所示。

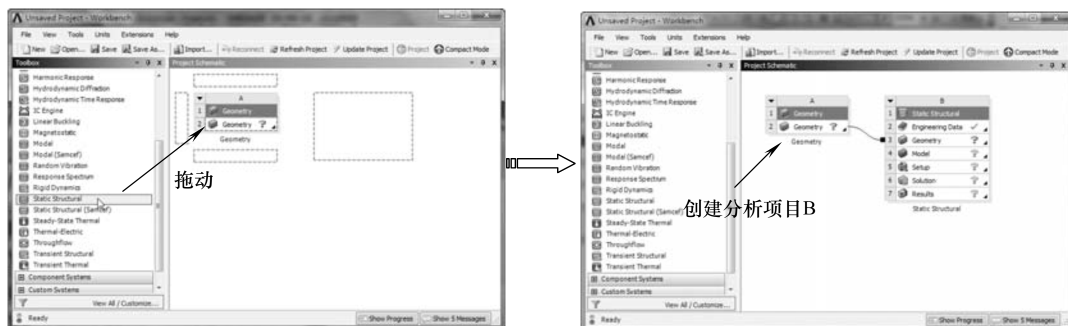


图 7-13 创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 7-14 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter07\7.2\uncompleted\Basketball_rim.sldprt”几何体文件，此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 7-15 所示。

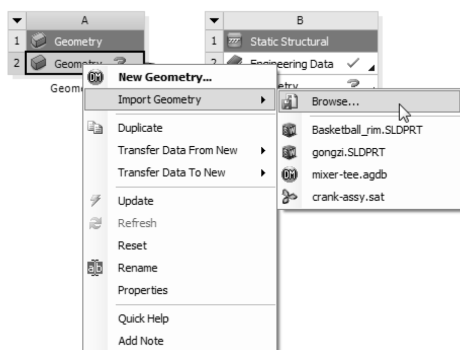


图 7-14　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

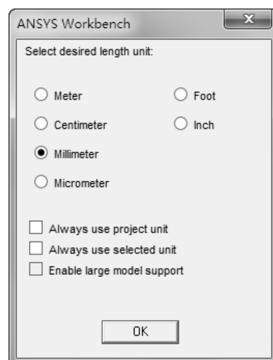


图 7-15　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 7-16 所示。

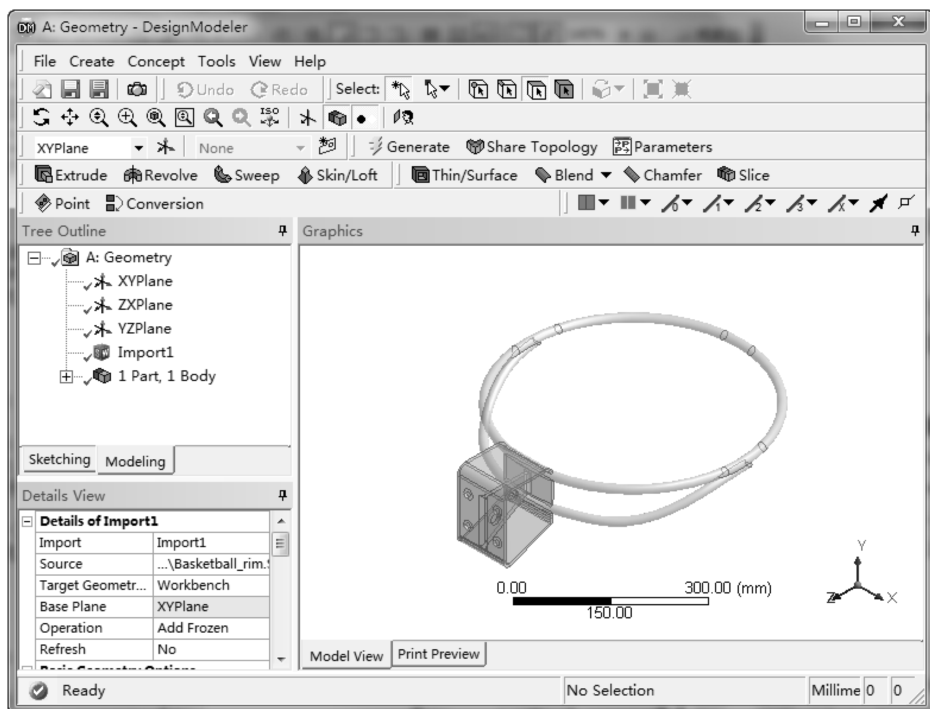


图 7-16　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击【Save】按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称，然后单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

3．添加材料库

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入 Engineering Data 界面。

2）在【Outline of Schematic B2：Engineering Data（工程数据）】窗口中单击【Click here to add a new material】选项，在空白处输入材料名称 usersteel，如图 7-17 所示。

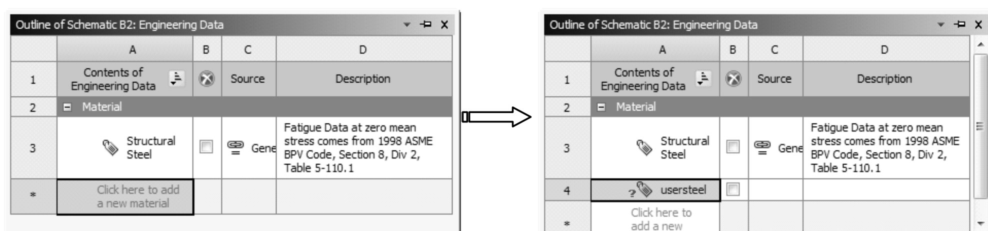


图 7-17　输入用户材料名称

3）在【Outline of Schematic B2：Engineering Data（工程数据）】窗口中选中新建的材料 usersteel，在【Toolbox（工具箱）】中【Linear Elastic】下的【Isotropic Elasticity】选项上按住鼠标左键，拖动到【Properties of Outline Row 4：usersteel】窗口中的 A1 栏的【Property】选项上，释放鼠标创建弹性属性并输入属性值，如图 7-18 所示。

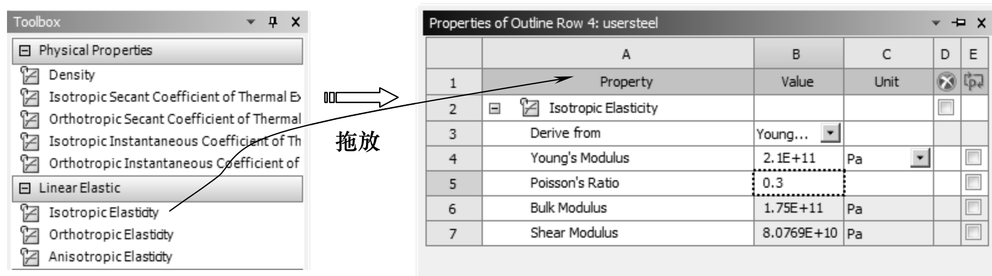


图 7-18　创建弹性属性

4）同理，在【Toolbox（工具箱）】中【Strength】下的【Tensile Ultimate Strength】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，释放鼠标创建抗拉强度属性并输入属性值，如图 7-19 所示。

5）同理，在【Toolbox（工具箱）】中【Life】下的【Alternating Stress R-Ratio】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，放开鼠标创建 *S-N* 属性，如图 7-20 所示。

6）在【Table Properties Row 8:Alternating Stress R-Ratio】窗口输入应力寿命参数，并在【Chart of Properties Row 8:Alternating Stress R-Ratio】窗口中显示该曲线，如图 7-21 所示。

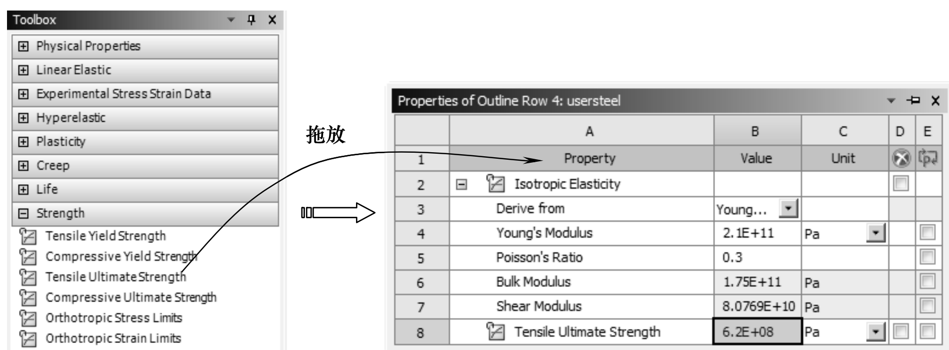


图 7-19　添加抗拉强度属性

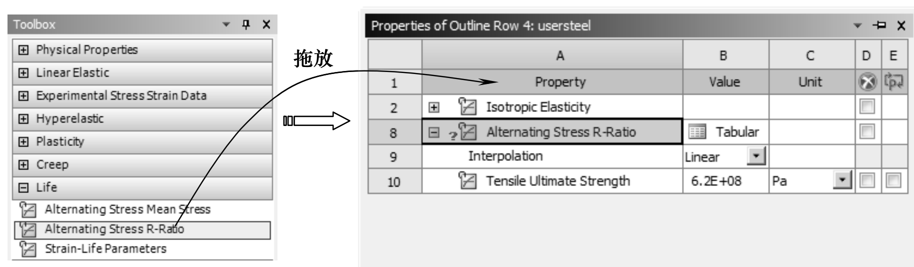


图 7-20　添加 *S*-*N* 属性

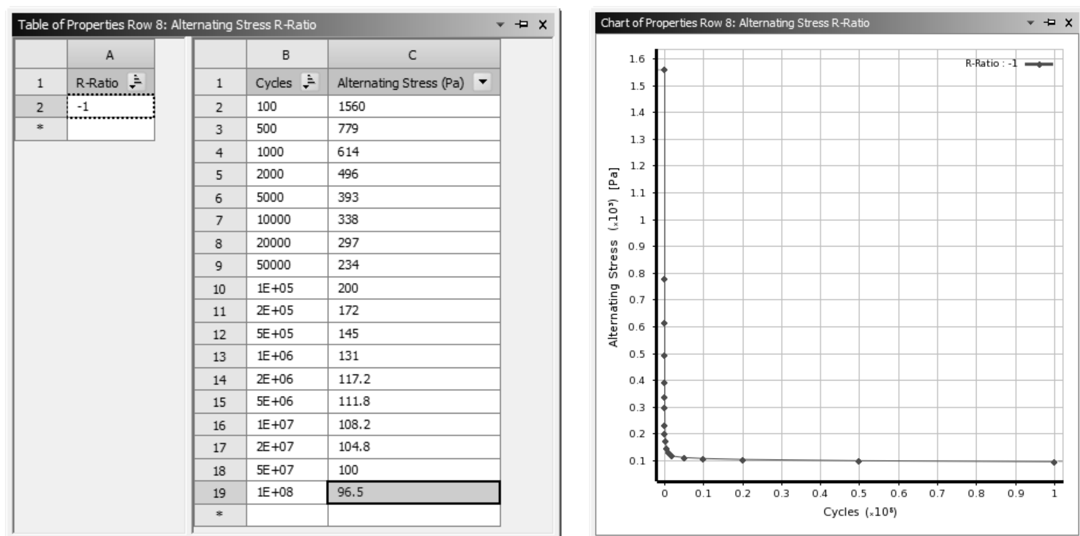


Table of Properties Row 8: Alternating Stress R-Ratio

	A
1	R-Ratio
2	-1
*	

	B	C
1	Cycles	Alternating Stress (Pa)
2	100	1560
3	500	779
4	1000	614
5	2000	496
6	5000	393
7	10000	338
8	20000	297
9	50000	234
10	1E+05	200
11	2E+05	172
12	5E+05	145
13	1E+06	131
14	2E+06	117.2
15	5E+06	111.8
16	1E+07	108.2
17	2E+07	104.8
18	5E+07	100
19	1E+08	96.5
*		

图 7-21　输入应力应变曲线

7）单击【Return to Project】按钮 Return to Project ，返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入

Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 7-22 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 7-23 所示。



图 7-22　Mechanical 用户界面

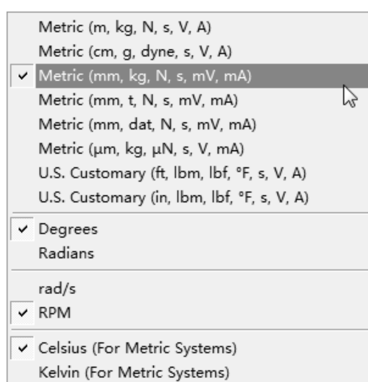


图 7-23　设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的【Basketball rim】，此时在【Details of“Basketball_rim”（参数列表）】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击▸按钮，选择【usersteel】，如图 7-24 所示。

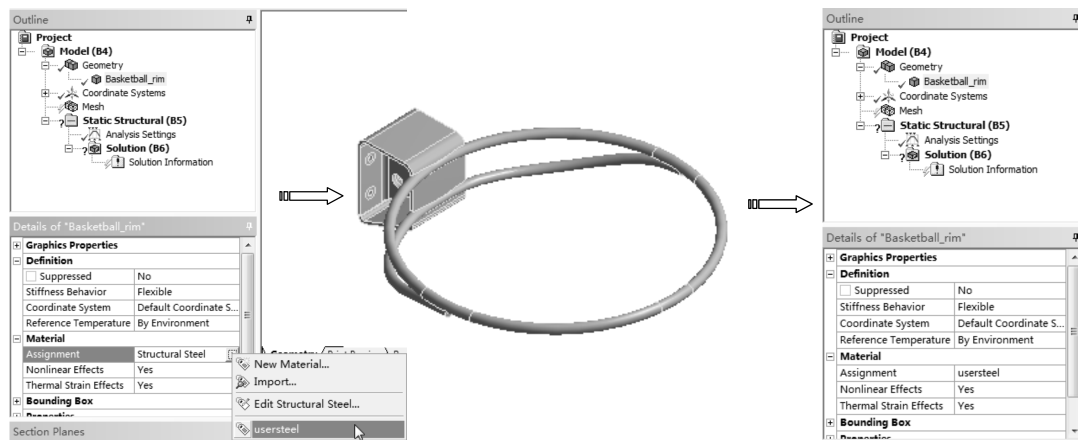


图 7-24　设置篮圈材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 15mm，如图 7-25 所示。

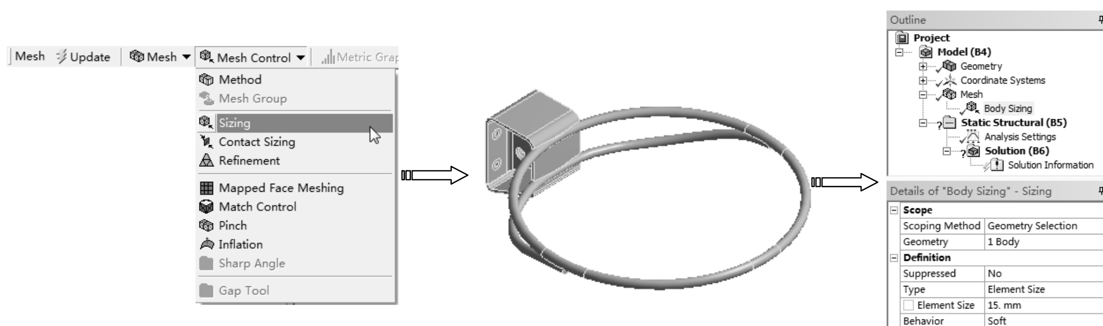


图 7-25　选择实体并设置网格尺寸

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 7-26 所示。

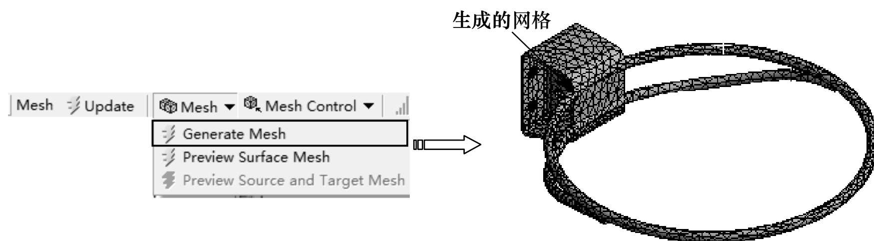


图 7-26　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 7-27 所示。

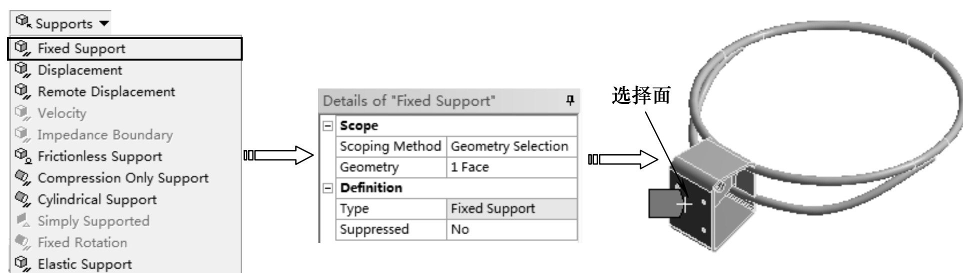


图 7-27　施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在

【Details of“Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 7-28 所示表面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Y Component】文本框中输入–1000，如图 7-28 所示。

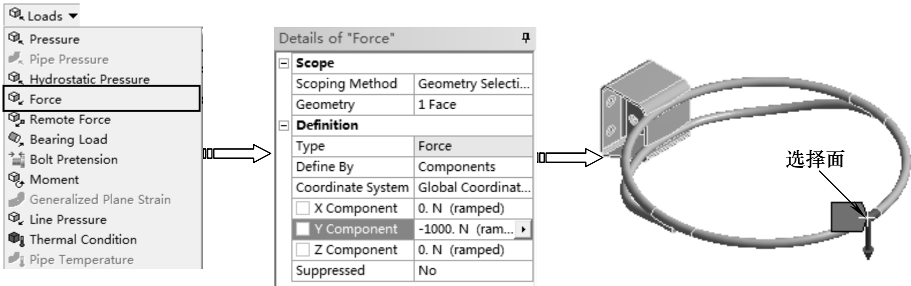


图 7-28 施加力

7. 设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 7-29 所示。

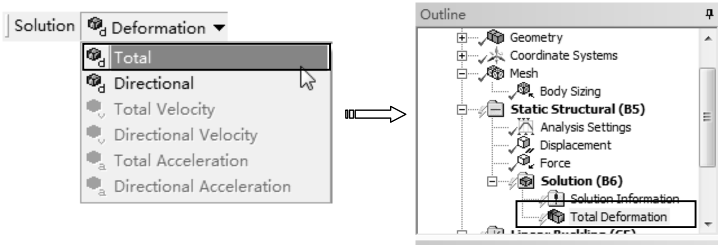


图 7-29 添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 7-30 所示。

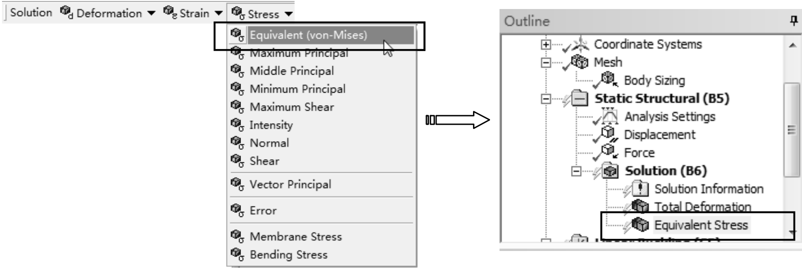


图 7-30 添加应力求解项

8. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve 启动求解。系统弹出进度条，表示正在求解。

求解完成后进度条自动消失，如图 7-31 所示。

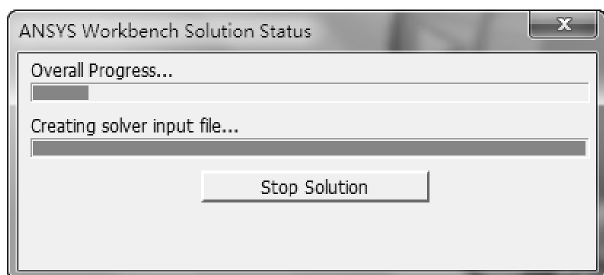


图 7-31　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale)】项，可真实显示变形云图，如图 7-32 所示。

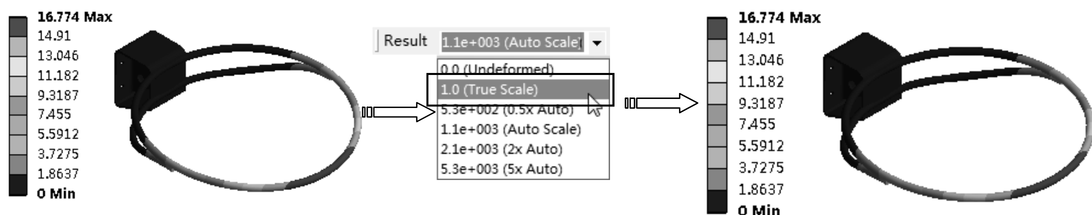


图 7-32　变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0 （True Scale)】项，可真实显示应力云图，如图 7-33 所示。

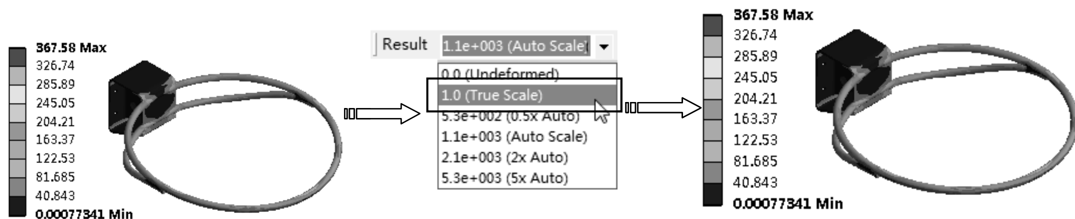


图 7-33　应力云图

9．设置疲劳工具

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）插入疲劳工具。单击【Solution】工具栏上的【Tools】|【Fatigue Tool】命令，在详细设置窗口中设置【Type】为 Zero-Based，【Mean Stress Theory】为 Goodman，【Stress Component】为 Signed Von Mises，如图 7-34 所示。

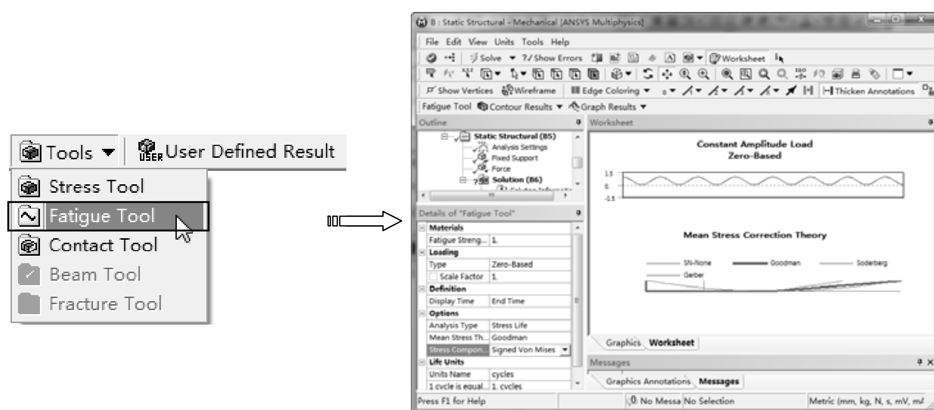


图 7-34　插入疲劳工具

3）求解寿命。单击【Fatigue Tool】工具栏上的【Contour Results】|【Life】命令，此时在分析树中插入【Life】项，如图 7-35 所示。

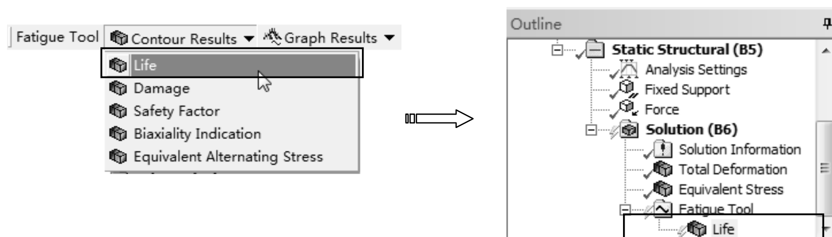


图 7-35　添加寿命求解项

4）求解损伤。单击【Fatigue Tool】工具栏上的【Contour Results】|【Damage】命令，此时在分析树中插入【Damage】项，如图 7-36 所示。

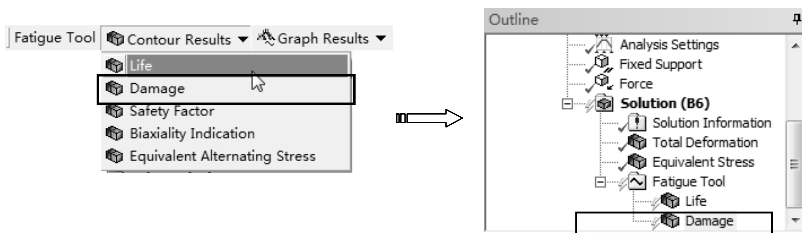


图 7-36　添加损伤求解项

5）求解安全系数。单击【Fatigue Tool】工具栏上的【Contour Results】|【Safety Factor】命令，此时在分析树中插入【Safety Factor】项，如图 7-37 所示。

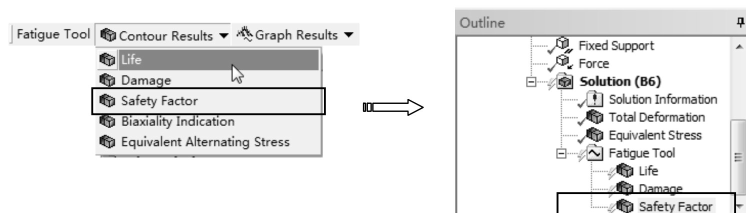


图 7-37　添加安全系数求解项

10．求解疲劳分析并显示分析结果

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，选中其下的【Fatigue Tool】选项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，求解疲劳分析，如图 7-38 所示。

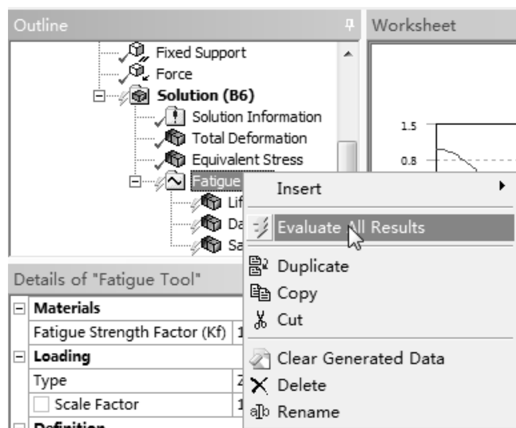


图 7-38　求解疲劳分析

2）疲劳寿命云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Life】项 Life，在图形窗口显示出疲劳寿命云图，如图 7-39 所示。

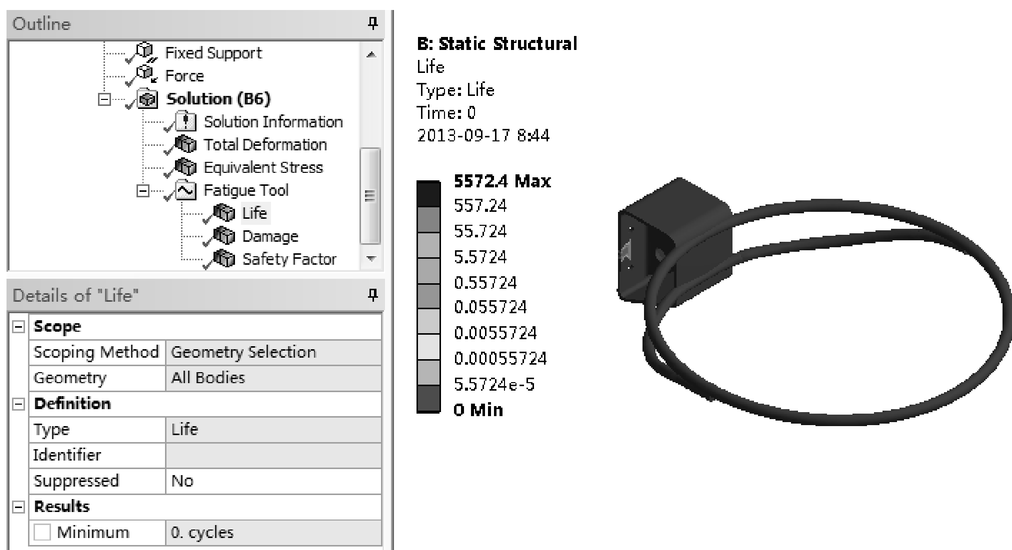


图 7-39　疲劳寿命云图

3）损伤云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Damage】项 Damage，在图形窗口显示出损伤云图，如图 7-40 所示。

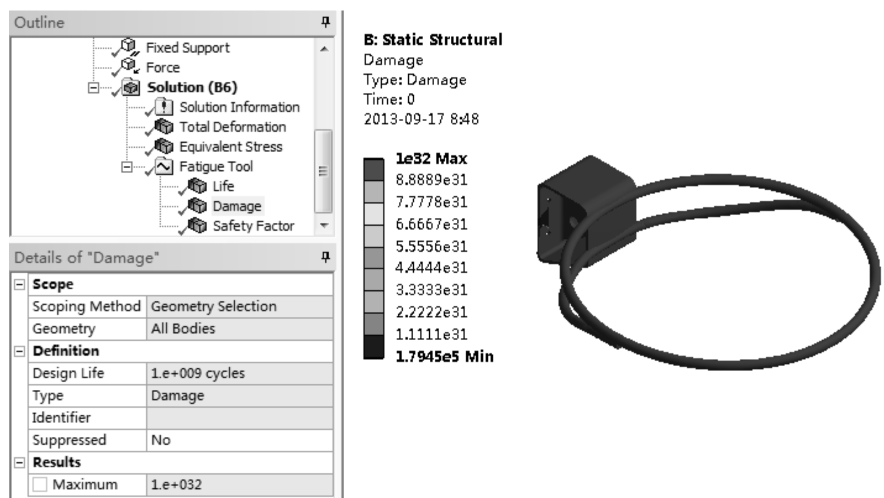


图 7-40　损伤云图

4）安全系数云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Safety Factor】项 Safety Factor，在图形窗口显示出安全系数云图，如图 7-41 所示。

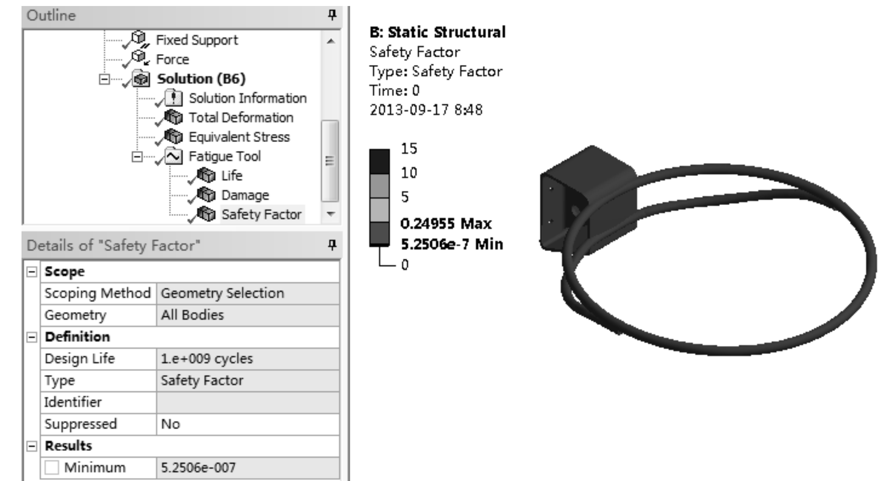


图 7-41　安全系数云图

11．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

7.2.4　实例总结

本节以篮圈为例讲解了 ANSYS Workbench 的疲劳有限元分析方法和具体应用步骤，读

者在学习过程中需要注意的是：在工程材料中需要输入 *S-N* 曲线数据，可在【Toolbox（工具箱）】中【Life】下的【Alternating Stress R-Ratio】选项中设置 *S-N* 属性。

7.3　实例 2——轴零件的疲劳分析

7.3.1　实例说明

一根变截面轴，左边轴段（蓝色部分）固定，而在最右边轴段上（红色部分）施加一个 1N 的集中力（它导致弯曲变形）和一个 1000N·mm 的集中力偶（它导致扭转变形），如图 7-42 所示。该轴的材料是碳钢 SAE1045_390_QT，使用 nCode 方式进行轴疲劳分析。



图 7-42　轴

7.3.2　分析思路

本例使用 Workbench 和 nCode 对之进行疲劳分析，分为两步。第一步是在 Workbench 中建立有限元模型，并分别施加集中力和集中力偶，通过计算得到两种情况的等效应力；第二步在 nCode 中进行，首先根据疲劳分析的五框图构造疲劳分析流程，然后分别设定各个框图的属性，即有限元结果文件、载荷文件、材料文件、疲劳分析选项，最后启动分析通过后处理以查看轴上各点的疲劳寿命。

7.3.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 7-43 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 7-44 所示。

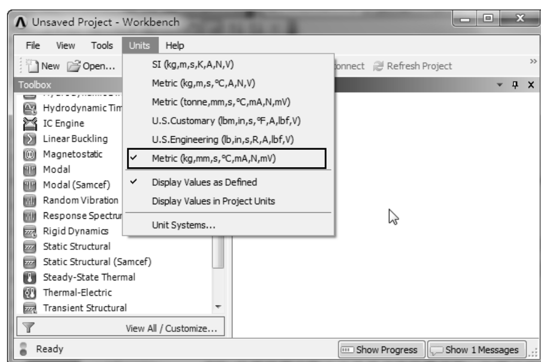


图 7-43　设置分析单位



图 7-44　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 7-45 所示。

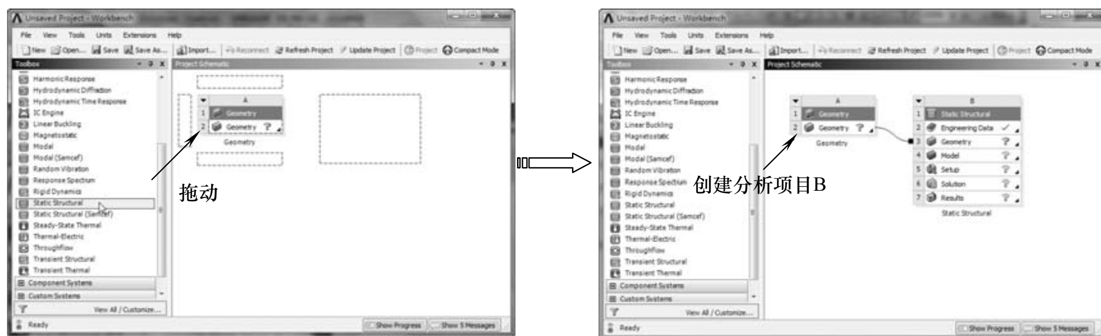


图 7-45　创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【nCode EN TimeSeries(DesignLife)】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 的【Solution】项上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 7-46 所示。

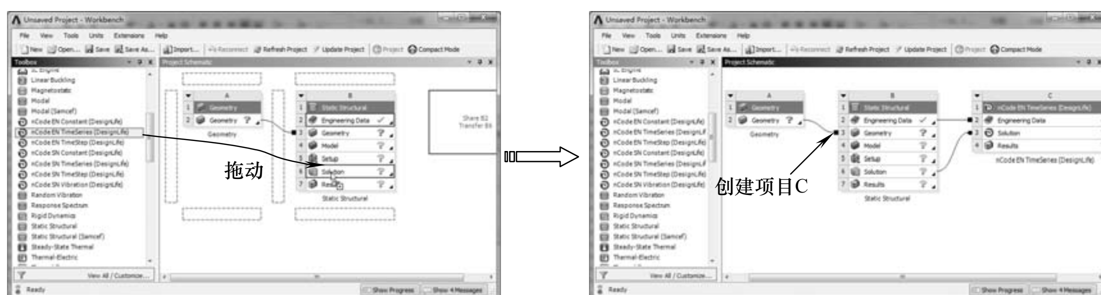


图 7-46　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 7-47 所示，弹出【打开】对话框。

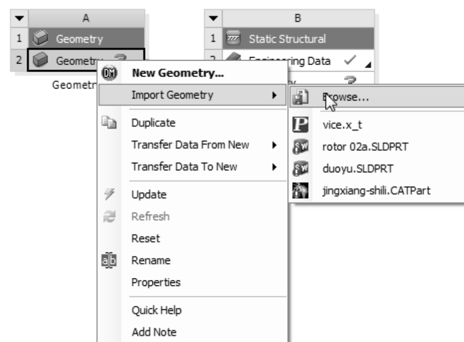


图 7-47　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter07\7.3\uncompleted\shaft.agdb”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，如图 7-48 所示。

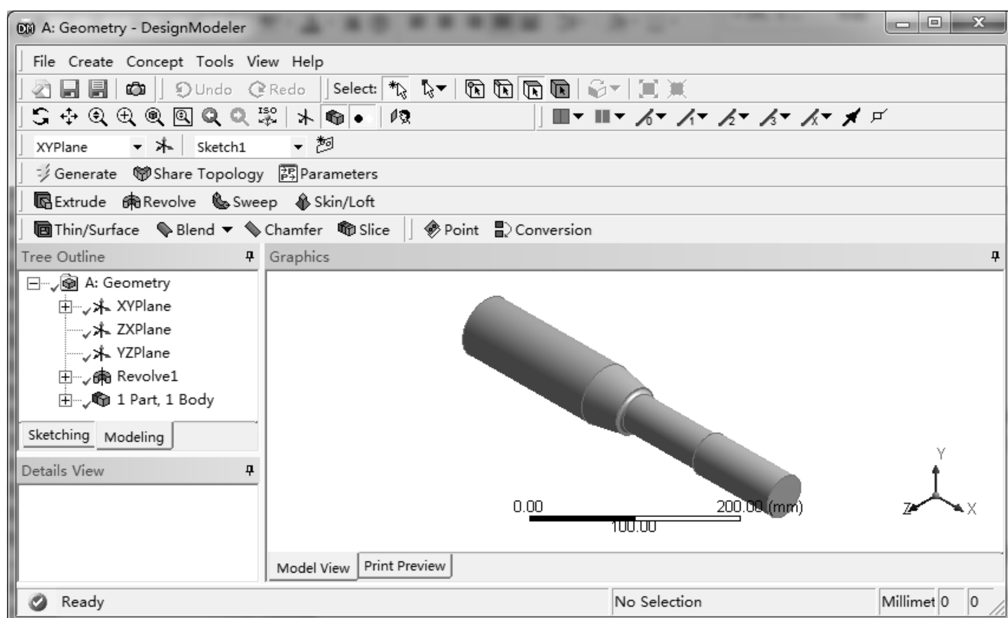


图 7-48　DesignModeler 界面

4）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

5）单击 💾 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3. 添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入如图 7-49 所示的材料参数设置界面。

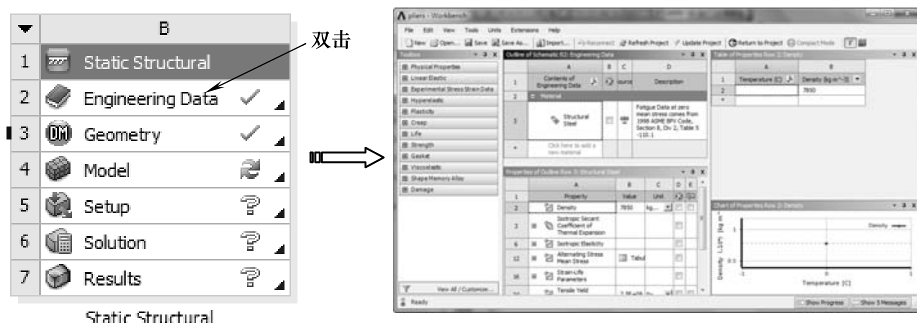


图 7-49　双击【Engineering Data】选项

2）在界面的空白处任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，原界面窗口中的【Outline of Schematic B2：Engineering Data】窗口消失，取代以【Engineering Data Sources（工程数据源）】和【Outline of Favorites（优先列表）】窗口，如图 7-50 所示。

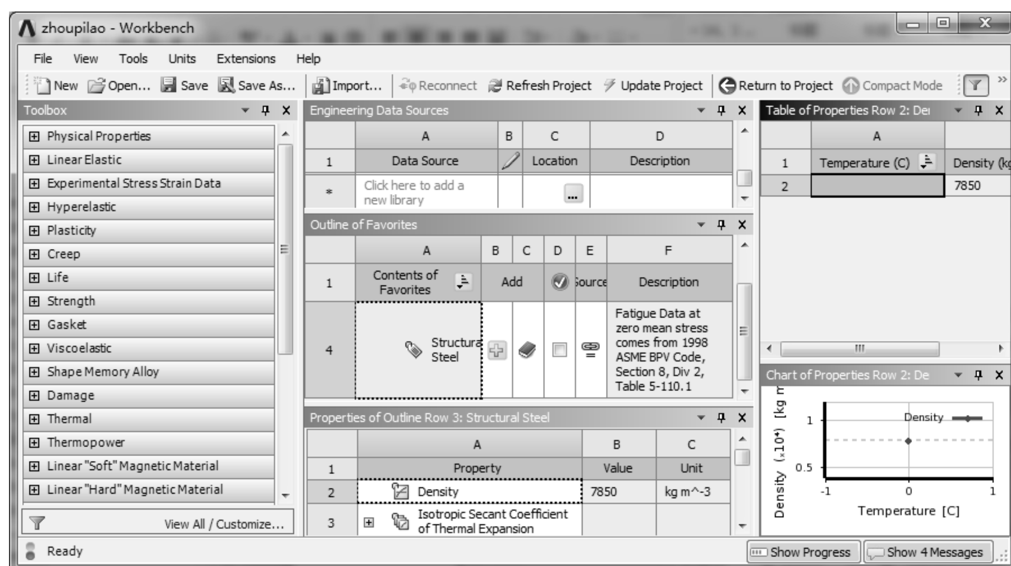


图 7-50　材料参数设置界面

3）单击【Engineering Data Sources】窗口底部最下一栏中【Click here to add a new library】C 栏中的按钮，弹出【打开】对话框，选择 ANSYS 14.5 nCode DesignLife 64-bit→GlyphWorks→mats 文件夹中的 nCode_matml.XML 文件，导入材料库，如图7-51所示。



图 7-51　导入材料库

4）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中 A3 栏中的【nCode_matml】项，出现【Outline of nCode_matml】窗口，如图 7-52 所示。

5）在【Outline of nCode_matml】窗口中单击 B78 栏的按钮，此时在 C78 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 7-53 所示。

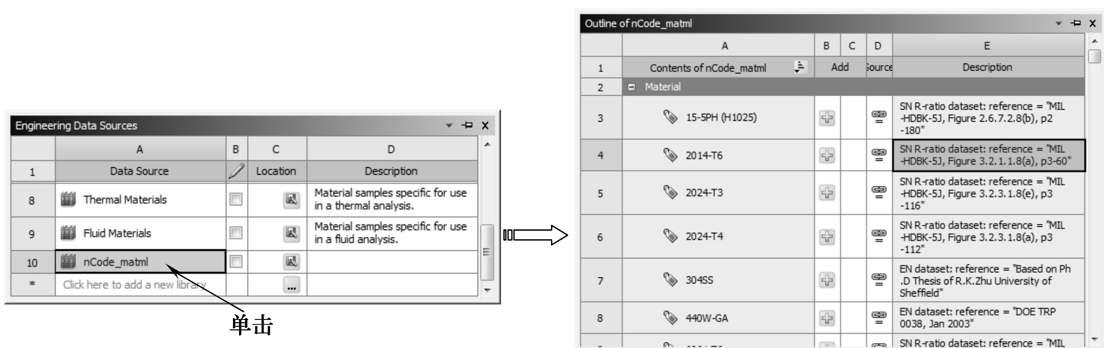


图 7-52　选择 nCode_matml 材料

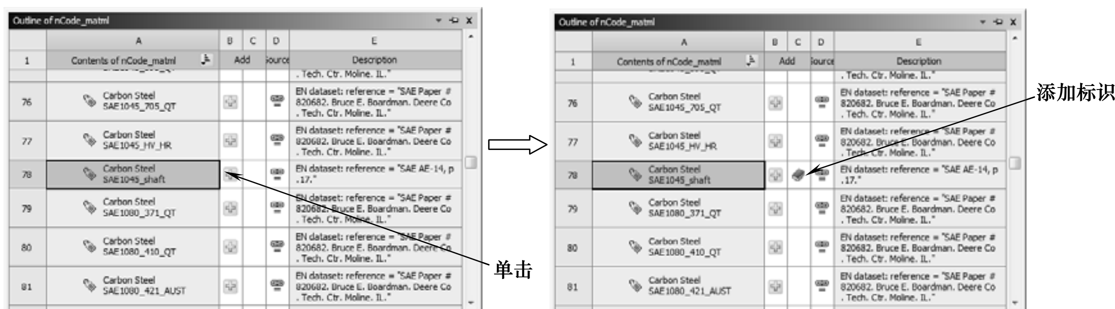


图 7-53　添加 Carbon Steel SAE 1045_shaft

6）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口并显示添加的材料。

7）单击【Return to Project】按钮 Return to Project ，返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 7-54 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 7-55 所示。

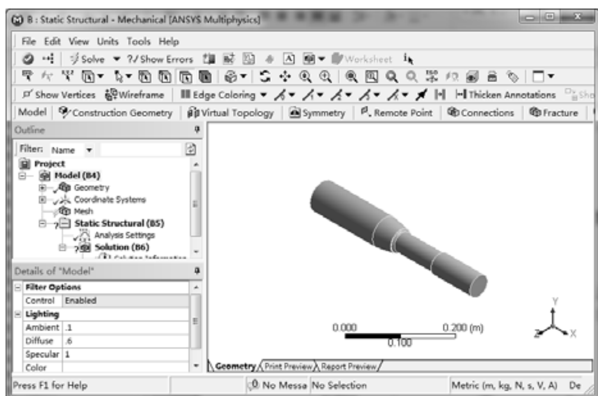


图 7-54　Mechanical 用户界面

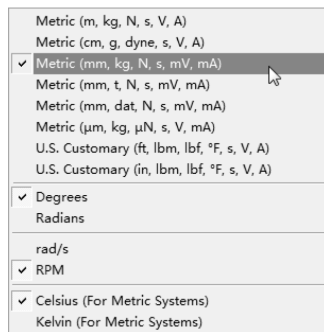


图 7-55　设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的【Solid】，此时在【Details of“Solid”（参数列表）】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击▸按钮，选择【Carbon Steel SAE1045-Shaft】，将材料设置为碳钢，如图 7-56 所示。

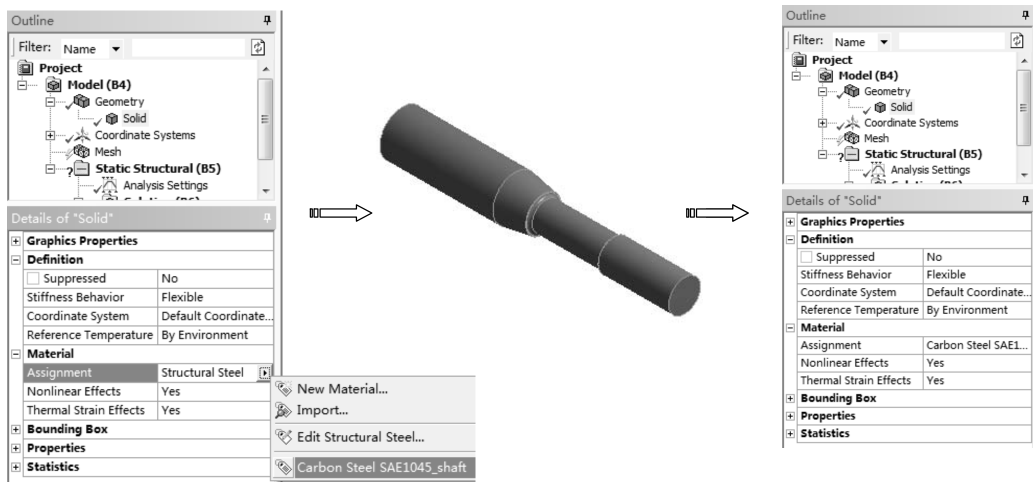


图 7-56　设置工件材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击窗口上方【图形选择】工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区单击选择实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 7-57 所示。

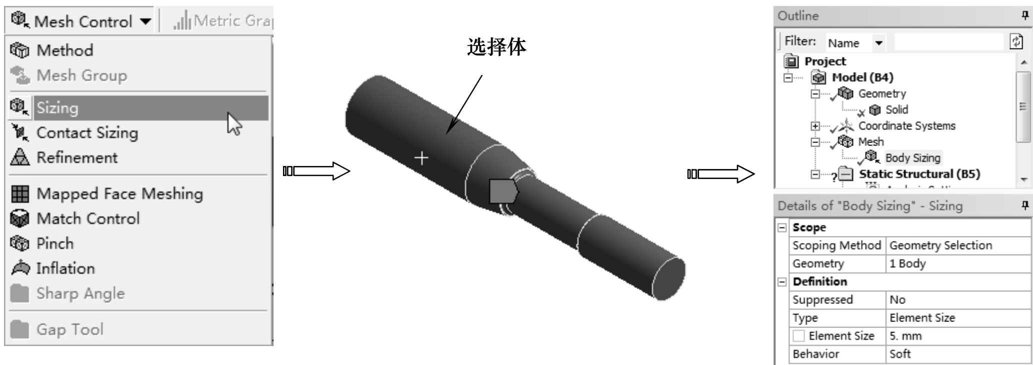


图 7-57　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 7-58 所示。

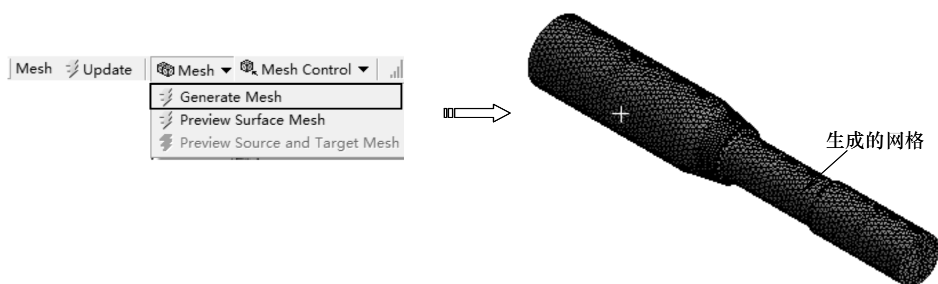


图 7-58　生成网格

6. 施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Analysis Settings】节点，在详细设置窗口中设置【Number Of Steps】为 2，如图 7-59 所示。

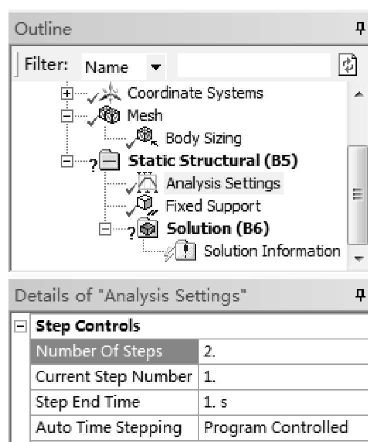


图 7-59　分析设置

2）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5)】节点，显示【载荷】工具栏。单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 7-60 所示圆柱面，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 7-60 所示。

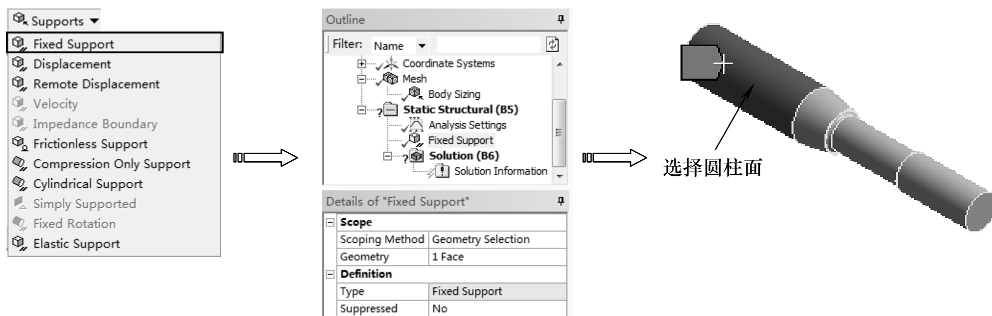
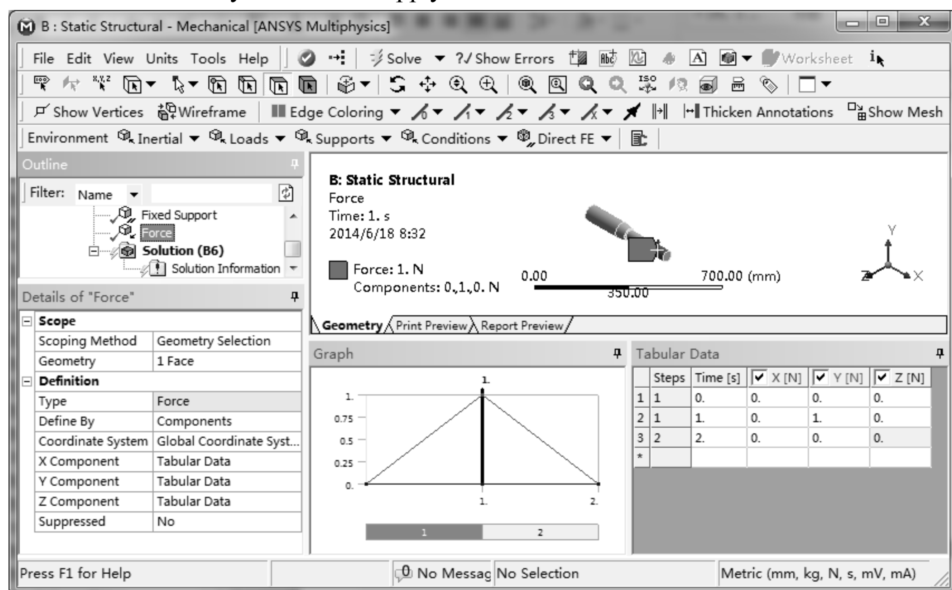


图 7-60　施加固定约束

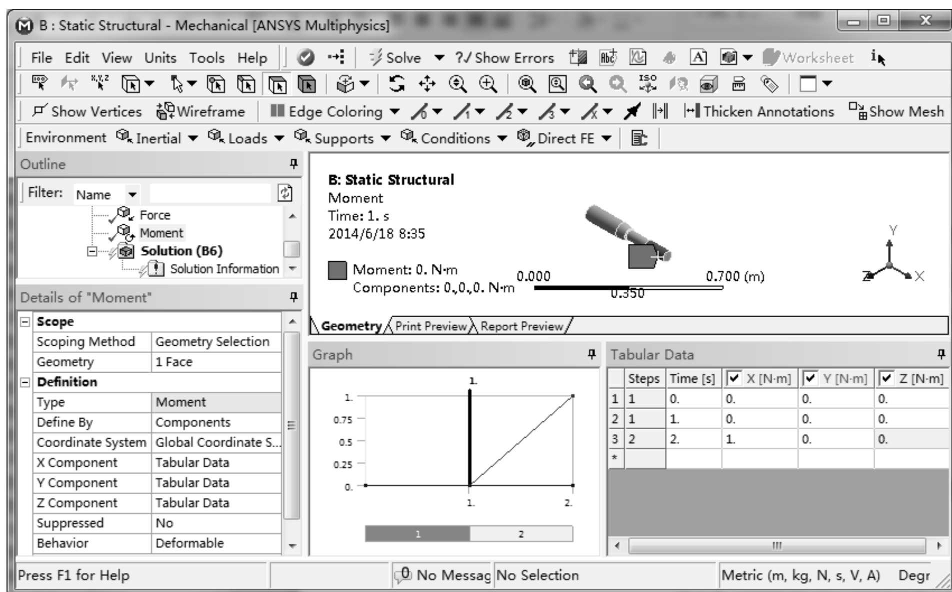
3）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 7-61 所示端部小圆柱表面，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，通过表形式施加力，如图 7-61 所示。



	Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	1	0.	0.	0.	0.
2	1	1.	0.	1.	0.
3	2	2.	0.	0.	0.
*					

图 7-61　施加力

4）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Moment】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Moment”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 7-62 所示端部小圆柱表面，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，通过表形式施加力矩，如图 7-62 所示。



	Steps	Time [s]	X [N·m]	Y [N·m]	Z [N·m]
1	1	0.	0.	0.	0.
2	1	1.	0.	0.	0.
3	2	2.	1.	0.	0.
*					

图 7-62　施加力矩

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 7-63 所示。

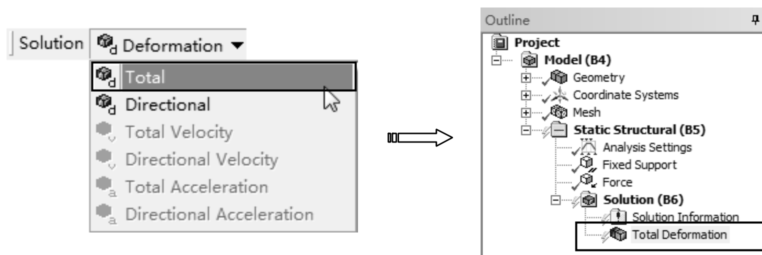


图 7-63　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 7-64 所示。

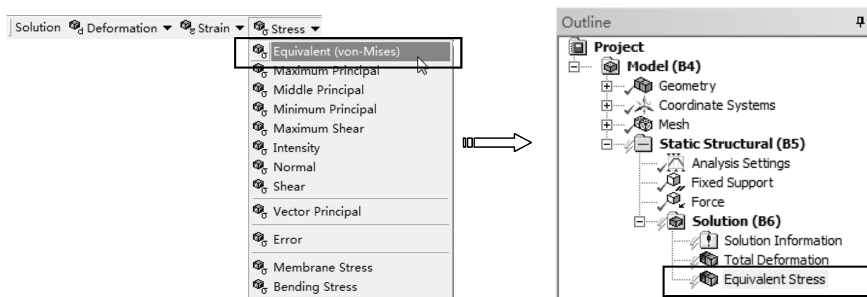


图 7-64　添加应力求解项

8．求解静力学并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 7-65 所示。

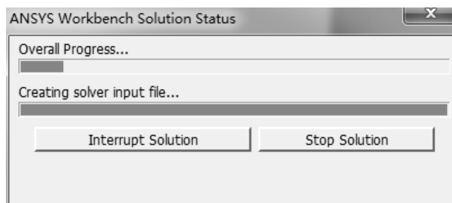


图 7-65　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 7-66 所示。

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True

Scale)】项，可真实显示应力云图，如图 7-67 所示。

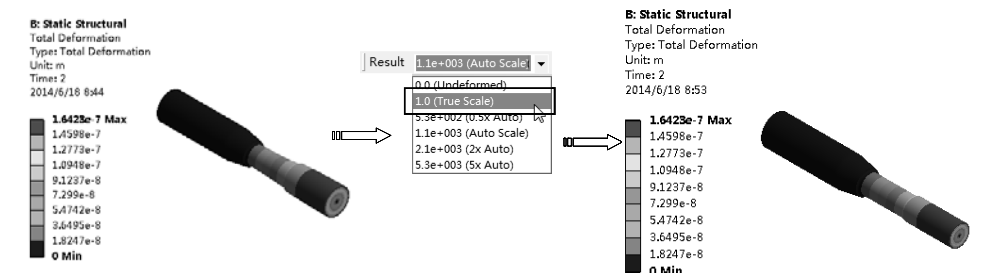


图 7-66　变形云图

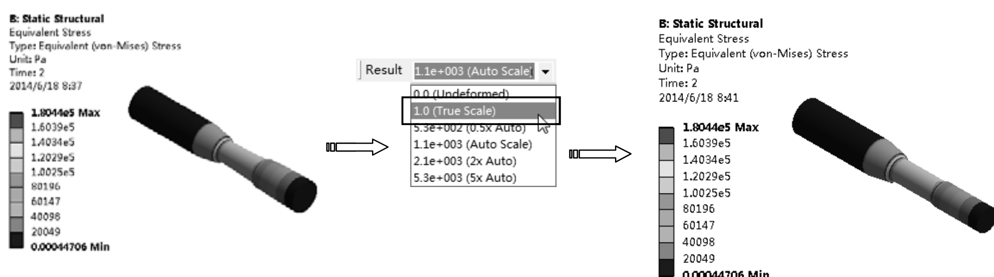


图 7-67　应力云图

4）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

5）单击窗口上方的【Update】按钮更新求解。

9．启动 nCode 分析

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C3 栏的【Solution】项，进入 nCode 界面，如图 7-68 所示。

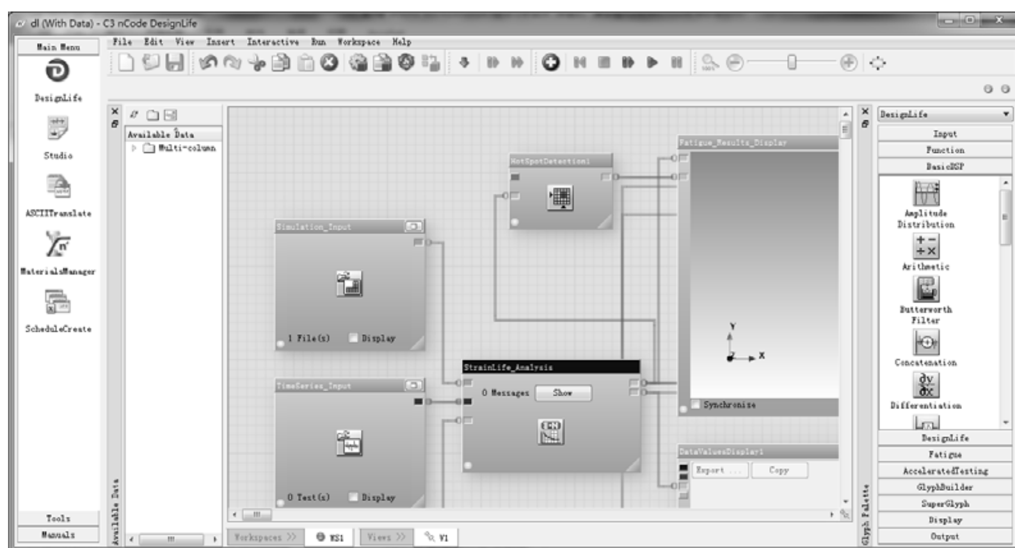


图 7-68　nCode 界面

2）选择【File】|【Open Data Files】命令，弹出【Open Data Files】对话框，单击【Browse】按钮，弹出【Select Folder】对话框，选择载荷文件所在的文件夹，单击【OK】按钮完成，如图 7-69 所示。

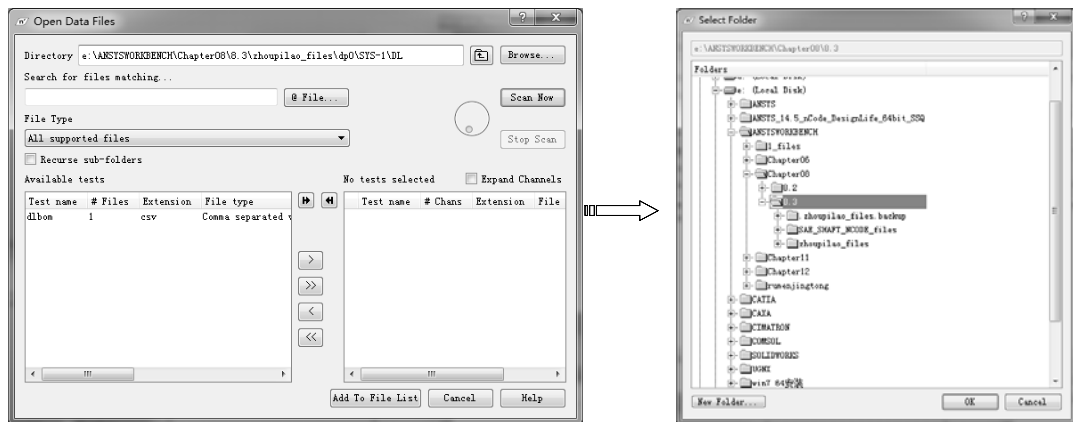


图 7-69　选择载荷文件夹

3）单击【Open Data Files】对话框中的【Scan Now】按钮，此时载荷文件被读入到【Available tests】栏，选中该载荷文件，然后单击 > 按钮，使载荷文件移动到右侧栏中，单击【Add To File List】按钮完成，如图 7-70 所示。

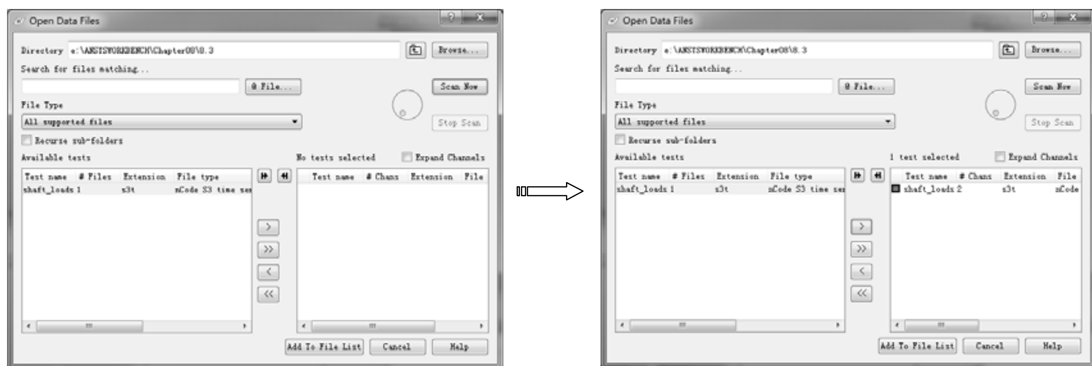


图 7-70　加载载荷

4）关联有限元分析结果文件。在【Simulation_Input】窗口中选中下方的【Display】复选框，把有限元分析结果拖入到有限元输入框建立关联，如图 7-71 所示。

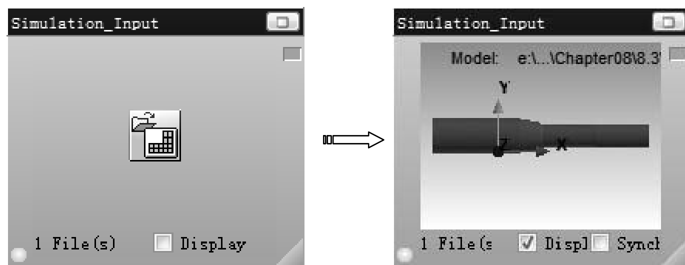


图 7-71　关联有限元分析结果

5）关联载荷文件。在【Available Data】窗口中拖动 shaft_loads.s3t 文件到【TimeSeries_Input】窗口，选中下方的【Display】复选框，把数据中的载荷时间历程文件拖入到时间序列输入框建立关联，如图 7-72 所示。

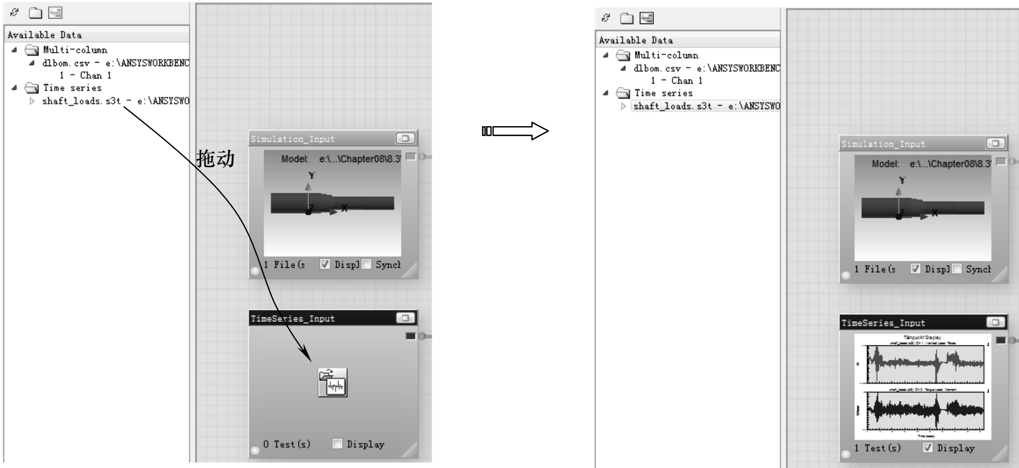


图 7-72　关联载荷文件

6）进行材料映射。在【StrainLife_Analysis】窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Edit Material Mapping】命令，弹出【Edit Material Map】对话框，选中下部的 Carbon Steel SAE1045_shaft，单击按钮，然后单击【OK】按钮完成，如图 7-73 所示。

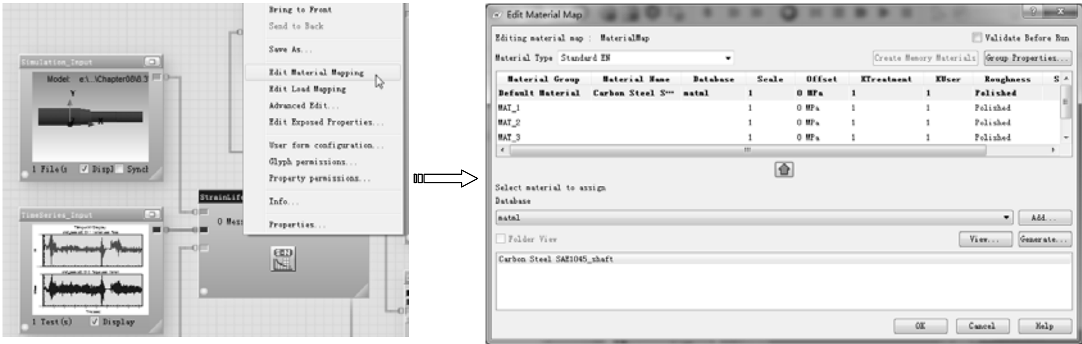
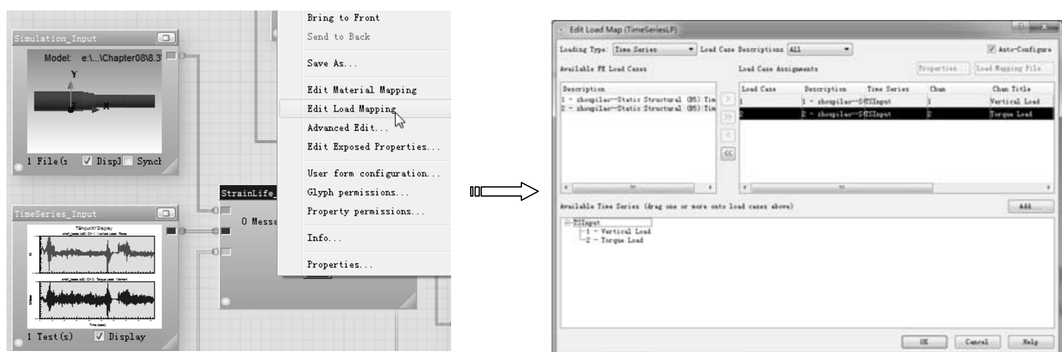


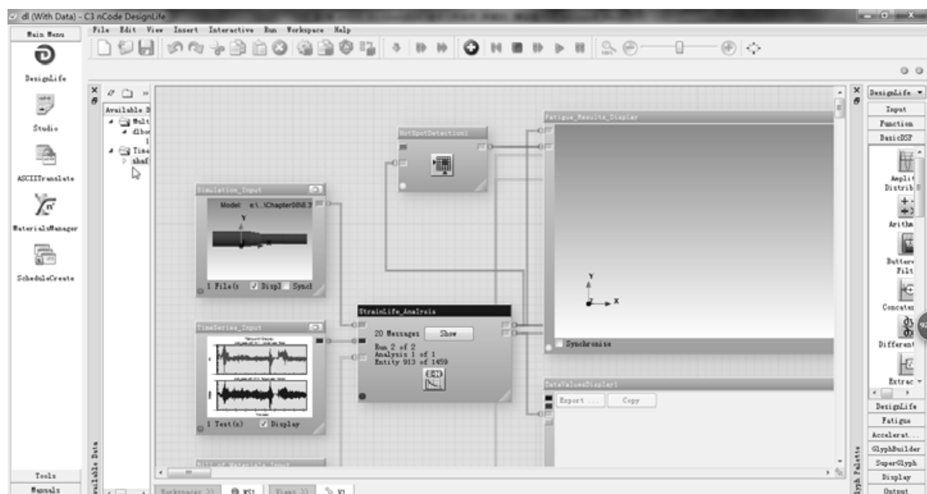
图 7-73　材料映射

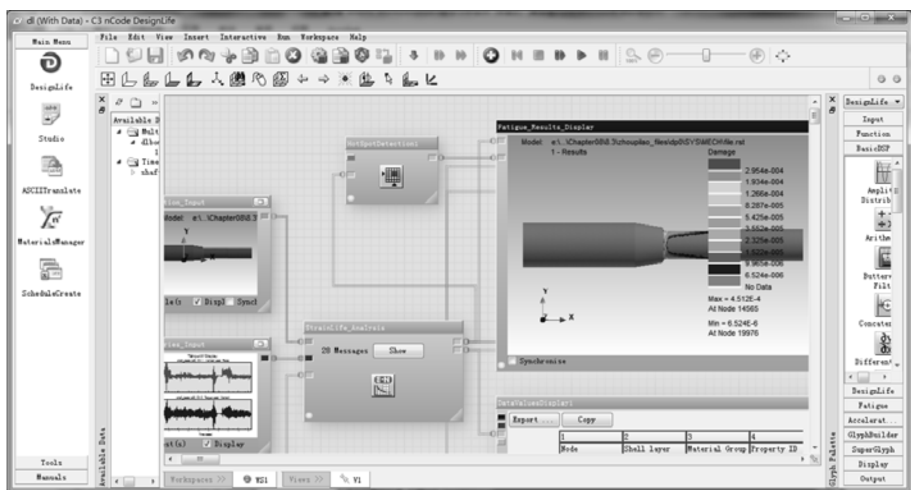
7）进行载荷映射。在【StrainLife_Analysis】窗口中单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Edit Load Mapping】命令，弹出【Edit Load Map】对话框，保持默认，则系统把第一种载荷工况（弯曲工况）与第一个时间序列建立关联，它表明了该集中力在按照此载荷时间历程发生改变；把第二种载荷工况（弯曲工况）与第二个时间序列建立关联，表明了该集中力在按照此载荷时间历程发生改变，如图 7-74 所示。

8）进行分析求解。单击窗口上方的▶按钮，启动分析求解，如图 7-75 所示。

9）计算完成后，显示结果画面，图中包含几何模型、载荷序列、结果云图、结果数据以及它们之间的关系，如图 7-76 所示。


图 7-74　载荷映射


图 7-75　求解进程


图 7-76　nCode 结果界面

10）单击 nCode 界面右上角的【关闭】按钮，退出返回 ANSYS Workbench 主界面，

单击窗口上方的【Update】按钮更新求解。

11）后处理。双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C4 栏的【Results】项，进入【nCodeViewer】界面，显示求解结果，由图可知在固定端处的连接拐角处最危险，如图 7-77 所示。

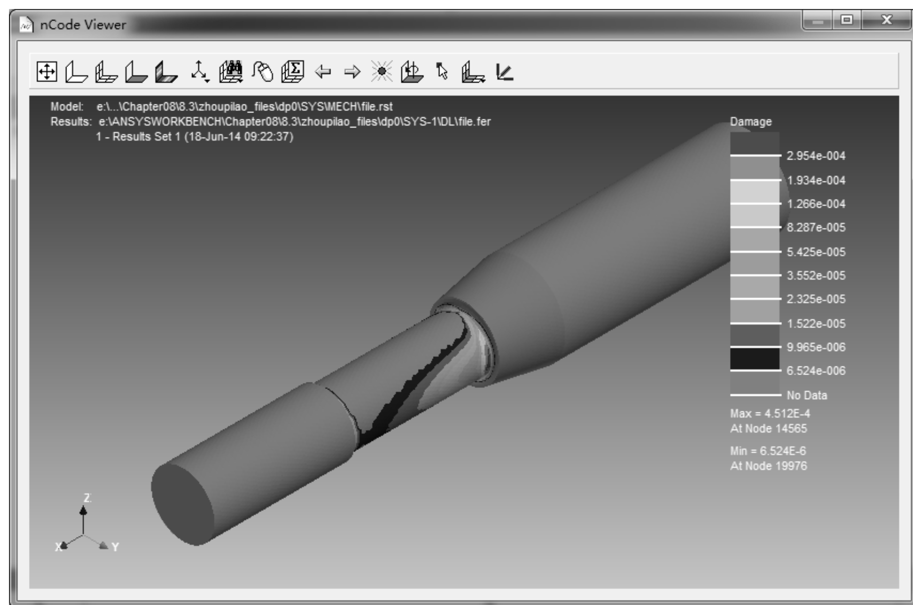


图 7-77　后处理云图

10. 保存和退出

1）单击 nCodeViewer 界面右上角的【关闭】按钮，退出并返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

7.3.4　实例总结

本节以轴零件为例讲解了 ANSYS Workbench 和 nCode 联合疲劳分析的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：首先要在 Workbench 中进行静力分析，从而得到 ANSYS Workbench 的结构分析结果文件*.rst，然后在 DESIGNLIFE 中进行构造疲劳分析流程，设定各个框图的属性，即有限元结果文件、载荷文件、材料文件、疲劳分析选项，即可得到轴的疲劳寿命。

7.4　本章小结

本章通过实例讲解了 ANSYS Workbench 软件的疲劳分析方法，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。通过本章学习，读者将能掌握 ANSYS Workbench 疲劳分析的操作方法和实际应用。

第 8 章　ANSYS 14.5 Workbench 结构非线性分析实例

结构非线性分析是工程上常见的分析问题。ANSYS 提供了强大的结构非线性分析功能，可对常见的结构非线性问题进行很方便的求解分析。本章将对 ANSYS 14.5 Workbench 软件的结构非线性分析原理进行介绍，并通过典型案例对结构非线性分析的方法和步骤进行详细讲解。

8.1　结构非线性分析概述

结构非线性分析是生产生活中经常遇到的一类分析类型，构件变化的集合形状一般会引起结构的非线性响应，一般来说，随着位移增长，一个有限单元已移动的坐标可以以多种方式改变结果的刚性。

8.1.1　结构非线性分析简介

在工程问题中，会经常遇到非线性结构分析问题。例如，无论何时用订书钉订书，金属订书钉将永久地弯曲成一个不同形状；在一个木制书架上放置重物，随着时间的迁移垂度将不断增大；汽车轮胎与路面之间的接触将随着质量的变化而变化，如图 8-1 所示。从图中的变形曲线可见，它们都显示了明显的非线性特征。

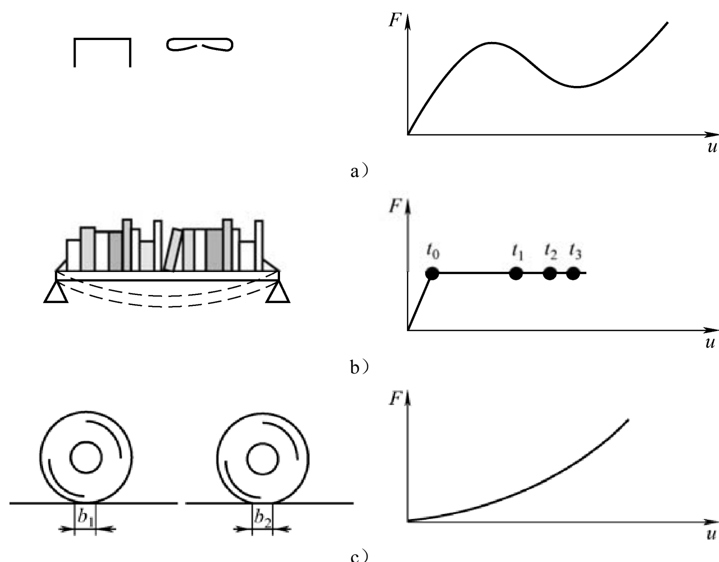


图 8-1　非线性结构行为示例

a）订书钉　b）木书架　c）轮胎

8.1.2　结构非线性分类

非线性问题可分为 3 大类：几何非线性、材料非线性和状态非线性。下面分别加以介绍。

1．几何非线性

如果结构经受大变形，它变化的几何形状可能会引起结构的非线性响应。如图 8-2 所示的钓鱼竿，在轻微的垂向作用下，会产生很大的变形。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以至于动力臂明显地减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。一般来说，随着位移增长，一个有限单元已移动的坐标可以以多种方式改变结构的刚度（两种方式改变：如果这个单元的形状改变，它的单元刚度将改变；如果这个单元的取向改变，它的局部刚度转化到全局部件的变换也将改变），这类问题总是非线性的，需要进行迭代获得一个有效的解。

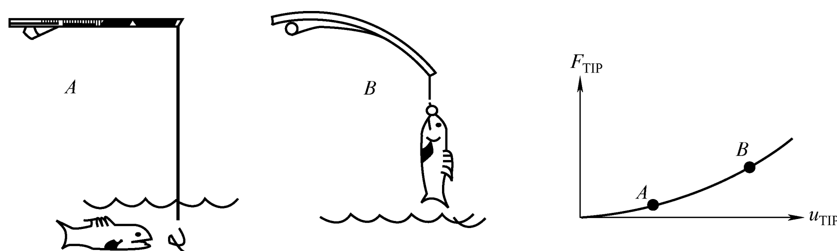


图 8-2　钓鱼竿几何非线性

小的变形和小的应力应变分析假定位移小到足够使所得到的刚度变得无足轻重，这样刚度不变假定意味着使用基于最初几何形状的机构刚度的一次迭代，足以计算出小变形分析中的位移。什么时候使用“小”变形和应变依赖于特定分析中要求的精度等级。相反，大应变分析说明由单元的形状和取向改变导致的刚度改变。因为刚度受位移影响，反之亦然，所以在大应变分析中需要迭代求解来得到正确的位移。

2．材料非线性分析

非线性的应力-应变关系是结构非线性的常见原因。许多因素可以影响材料的应力-应变性质，包括加载历史（如在弹塑响应状态下）、环境状况（如温度）、加载的时间总量（如在蠕变响应状态下）。ANSYS 的材料非线性分析能力包括弹塑性分析、超弹分析、蠕变分析等。本书只介绍弹塑性分析。

塑性是指在某种给定载荷下，材料产生永久变形的材料特性。对大多的工程材料来说，当其应力低于比例极限时，应力-应变关系是线性的。另外，大多数材料在其应力低于屈服点时，表现为弹性行为。也就是说，当把载荷移走时，其应变也完全消失。由于屈服点和比例极限相差很小，因此在 ANSYS 程序中，假定它们相同。在应力-应变曲线中，低于屈服点的称为弹性部分，超过屈服点的称为塑性部分，或者称为应变强化部分。弹塑性分析就是既考虑弹性部分，又考虑塑性区域的材料特性。

3．状态非线性分析

许多普通结构表现出一种与状态相关的非线性行为。例如，一根只能拉伸的电缆可能是松散的，也可能是绷紧的。轴承套可以是接触的，也可以是不接触的；冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变

也许和载荷直接有关（如电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。

接触是一种很普通的非线性行为。接触是状态变化非线性类型中一个特殊而且重要的子集。接触问题是一种高度非线性行为，需要较大的计算资源，为了进行实为有效的计算，理解问题的特性和建立合理的模型是很重要的。接触问题存在两个较大的难点：其一，在求解问题之前，不知道接触区域，表面之间是接触还是分开是未知的、突然变化的，这随载荷、材料、边界条件和其他因素而定；其二，大多的接触问题需要计算摩擦，有几种摩擦可选择，它们都是非线性的，摩擦使问题的收敛性变得困难。接触问题分为两种基本类型：刚体-柔体的接触、柔体-柔体的接触。

8.1.3 接触分析简介

接触是一种高度非线性行为，计算时一般需要较多的计算资源，因此理解接触的实质、建立合理有效的模型、设置有效接触参数是至关重要的。

1. 接触和接触算法

当两个物体表面相互接触并相切时，二者处于接触状态。在形成接触的不同物体的表面之间，可以沿法向自由分离和沿切向相互移动，但不能发生相互渗透，可传递法向压缩力和切向摩擦力，但不能传递法向拉伸力，如图 8-3 所示。

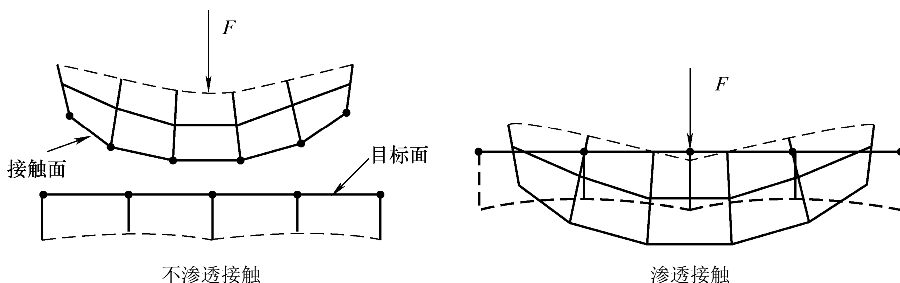


图 8-3 接触方式

接触表面间不能发生互相穿透，接触算法必须在接触表面间建立某种关系来模拟此特性，这称为强制接触协调。在 Mechanical 中提供了纯粹的罚函数法（Pure Penalty）、纯拉格朗日法（Normal Lagrange）、多点约束方程法（MPC）、增强拉格朗日法（Augmented Lagrange）等，以执行强制接触协调。

（1）罚函数法　罚函数的基本原理是：计算每一载荷子步时先检查接触面和目标面间是否存在穿透，若没有则不作处理。如果有穿透，则在目标面和接触面间引入一个法向接触力 F_N：

$$F_N = K_N x$$

式中，K_N 为法向接触刚度；x 为穿透深度（见图 8-4）。

这相当于在接触面和目标面间沿法向放置一个弹簧，以限制穿透的大小。接触刚度越大，则穿透就越小，理论上在接触刚度为无穷大时，可实现真实的接触状态，使穿透值等于零。

但是，接触刚度过大会导致总体刚度矩阵病态，造成收敛困难。也就是说，接触刚度较大时，计算精度较高，但收敛困难。

（2）纯拉格朗日法　拉格朗日法与罚函数不同，不是采用力与位移的关系来求接触力，而是把接触力作为一个独立自由度直接求解，如图 8-5 所示。

$$F_N = DOF$$

该方法可得到 0 或接近 0 的穿透量，以得到真实接触条件，是一种精确的接触算法。但由于自由度的增加，会使计算效率降低，在接触状态发生急剧变化时，会产生震颤。

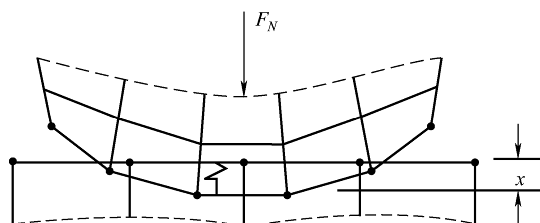


图 8-4　穿透量

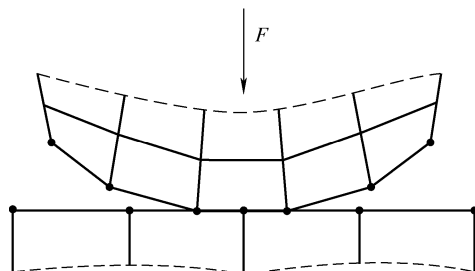
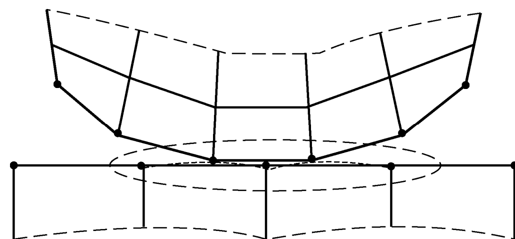


图 8-5　拉格朗日接触

（3）增强拉格朗日法　增强拉格朗日法与罚函数法的区别是，在罚函数法计算的法向接触力的基础上增加额外的接触力λ，使得计算对接触刚度的变化不像罚函数法那么敏感。

$$F_N = K_N x + \lambda$$

（4）多点约束方程法　对于特定的绑定和不分离两个面间的接触类型，可采用多点约束法。多点约束是通过在内添加约束方程来连接接触面间的位移的，如图 8-6 所示。


图 8-6　多点约束法接触

多点约束法不是罚函数法或拉格朗日法，而是直接处理绑定接触区域相关接触面的一种方式；多点约束法支持大变形效应。

2．接触类型

在 ANSYS Workbench 中接触（Contacts）包括面/面、面/边、边/边之间的接触（Contact）和点焊接触（Spot Weld），当装配体输入时，两个零件之间自动形成接触，接触连接可传递载荷和热流。

在 Mechanical 中系统提供了 5 种不同的接触类型：Bonded（绑定）、No Separation（不分离）、Frictionless（光滑无摩擦）、Rough（粗糙）及 Frictional（摩擦），这 5 种类型的接触特点见表 8-1。

表 8-1　接触类型和特点

接触类型	迭代次数	法向分离	切向滑移	线性特性
Bonded（绑定）	一次	无间隙	不允许滑移	线性接触
No Separation（不分离）	一次	无间隙	允许滑移	线性接触
Frictionless（光滑无摩擦）	多次	允许有间隙	允许滑移	非线性接触
Rough（粗糙）	多次	允许有间隙	不允许滑移	非线性接触
Frictional（摩擦）	多次	允许有间隙	允许滑移	非线性接触

3．接触控制

默认设置是由 CAD 系统导入装配体，程序自动检测接触并通过面与面的关系分配接触区域。通常接触默认设置和自动检测功能可处理大多数接触问题，但接触控制功能提供了更广泛的接触模拟，如图 8-7 所示。



图 8-7 【Contacts】详细设置窗口

✧ Priority（优先权）：可选择包括所有（Include All）、面优先（Face Overrides）、边优先（Edge Overrides）。面优先指面与面接触优先于面与边接触，不含边与边接触；边优先指边与边接触优于面与边接触，不含面与面接触。

✧ Group By（成组检测）：可选择实体（Bodies）、零件（Part）和无（None）。按实体成组指在一个接触区允许有多个面或边，按零件成组允许多个零件包含一个独立区域，不成组则生成的任何接触区的目标对象或接触对象上仅有一个面或边，如果一个单独区域包含大量的接触及目标面，则不成组检测方法可避免过多的接触搜索时间。另外，该选项也适用于不同的接触区域定义不同的接触行为，如螺栓和支座接触中，可在螺栓螺纹和支座之间定义绑定接触，而在螺栓头和支座之间定义无摩擦接触行为。

✧ Search Across（搜索范围）：搜索范围的自动检测可选择在实体间（Bodies）、不同零件的实体间（Part）、包含任何自接触的地方（Anywhere）。

4．接触区域控制

接触区域控制包括接触范围（Scoping）、定义接触（Definition）、高级控制（Advanced）等，如图 8-8 所示。

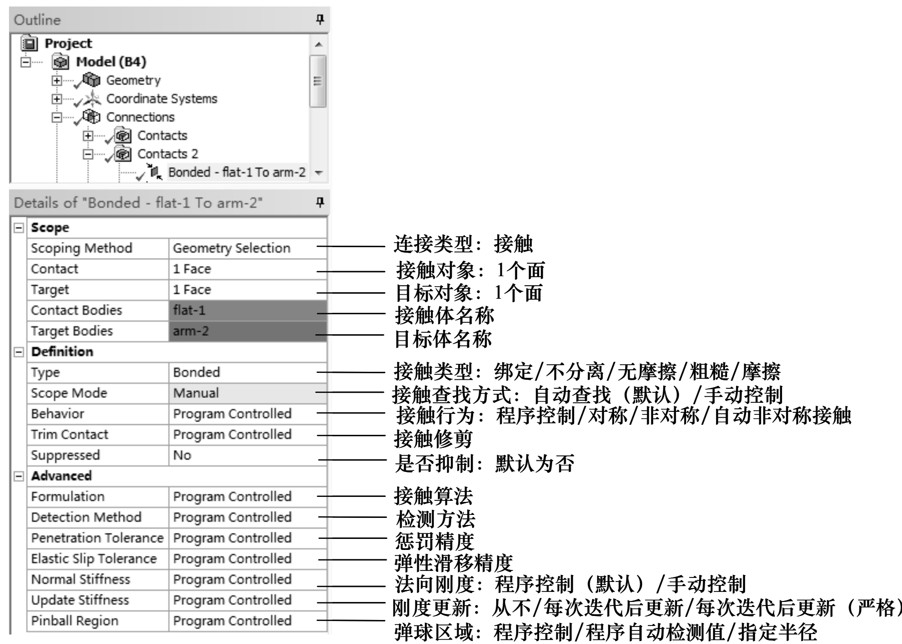


图 8-8 【接触】详细设置窗口

（1）Contact 和 Target（接触面和目标面） 在每个接触对中都要定义目标面和接触面。接触区域的其中一个对象构成接触面，此区域的另一对象构成目标面。接触中利用目标面的穿透量，在给定公差范围内来限制接触面上的积分点，但是其相反的情况是不正确的。

（2）Type（接触类型）接触类型有 5 种：绑定/不分离/无摩擦/粗糙/摩擦。

✧ Bonded（绑定）：默认设置，接触面或边无滑移、无分离，忽略间隙和穿透，线性求解。

✧ No Separation（不分离）：类似绑定接触，但是少量无摩擦滑移可以发生（显示动力分析中不支持此类接触）。绑定和不分离接触是最基础的线性行为，仅仅需要一次迭代。

✧ Frictionless（无摩擦）：标准的单边接触，也就是如果发生分离，则法向压力为零，摩擦系数为零，允许自由滑移，装配体中会施加弱弹簧以帮助稳定求解。

✧ Rough（粗糙）：类似于无摩擦接触，在无滑移处设置完全粗糙的摩擦接触，对应于无限大的摩擦系数（显示动力分析中不支持）。

✧ Frictional（摩擦）：摩擦接触中剪应力发生变化，直到发生相对滑移，该状态称为黏结（Sticking），摩擦系数为非负值。

（3）Behavior（接触行为） 在 Workbench 中接触面和目标面的内部指定是非常重要的。在 Mechanical 中接触面和目标面都会显示在每一个 Contact Region（接触区域）中，它们指定了两个相互接触的表面，接触面显示为红色，目标面显示为蓝色。

✧ Asymmetric（不对称接触）：当一个面为目标面而另一个面为接触面称为不对称接触，接触面的节点不能穿透目标面。非对称接触行为需要手工指定接触面和目标面。

✧ Symmetric（对称接触）：当两个面都为接触面或目标面时称为对称接触，此时任何一边都可穿透到另一边。对称接触行为容易设置，但需要较大计算量。
✧ Auto Asymmetric（自动非对称接触）：对于非对称或自动对称行为，仅仅限制接触面不能穿透目标面；自动非对称接触行为中，接触面和目标面的指定可在内部互换。

对于非对称接触行为，手工选择接触表面时应遵循以下原则：

✧ 当凸面与平面或凹面接触时，应选择平面或凹面为目标面。
✧ 当硬表面和软表面接触时，应选择硬表面为目标面。
✧ 当大表面和小表面接触时，应选择大表面为目标面。
✧ 如果结构已划分网格，具有粗糙网格的表面与具有细密网格的表面接触时，应选择粗糙表面为目标面。

（4）接触算法　接触算法从纯粹的罚函数法（Pure Penalty）到增强拉格朗日法（Augmented Lagrange）、多点约束方程法（MPC）或纯拉格朗日法（Normal Lagrange）。其中，增强拉格朗日一般应用于非线性接触模型中，多点约束方程法（MPC）仅适用于绑定接触，在绑定接触中，纯罚函数法可想象为在接触面间施加了十分大的刚度系数来阻止相对滑动，这个结果是在接触面间的相对滑动可忽略的情况下得到的。多点约束方程法对接触面间的相对运动定义了约束方程，因此没有相互的滑动，这个方程经常作为罚函数法的最好取代。

（5）Pinball Region（弹球区域）　弹球区域可自定义并在图形区显示。弹球区域定义了近距离开放式接触的位置，而超过弹球区域范围之外的为远距离开放式接触。如果一个在目标面上的节点处于这个球体内，WB-Mechanical 就会认为它“接近”接触，而且会更加密切地监测它与接触探测点的关系（也就是说什么时候及是否接触已经建立），在球体以外的目标面上的节点相对于特定的接触探测点不会受到密切监测，如图 8-9 所示。

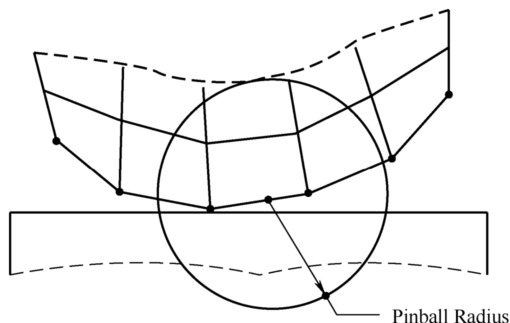


图 8-9　Pinball 区域

弹球区域一般作为十分有效的接触探测器使用，但是它也用于其他方面，例如绑定接触等。对于绑定或不分离的接触，假设间隙或穿透小于弹球区域，则间隙/穿透自动被删除，如对于以 MPC 为基础的绑定接触，可将搜索器设定为目标法向或弹球区域。假如存在间隙，弹球区域可以用来作为探测越过间隙的接触探测器。

（6）接触刚度　在 Workbench Mechanical 中默认为罚函数法（Pure Penalty），但在大变形问题的无摩擦或摩擦接触中建议使用增强拉格朗日法（Augmented Lagrange），这是因为增强拉格朗日公式增加了额外的控制自动减少渗透功能。

前面介绍的 K_N（法向接触刚度）亦称为法向刚度，它只用于 Pure Penalty 或 Augmented Lagrange，它是一个相对因子，一般变形问题建议使用 1.0，而对于存在弯曲支配的情况，如果收敛较困难，可以设置小于 1.0 的值，如图 8-10 所示。

Details of "Frictionless - flat-1 To arm-2"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Face
Target	1 Face
Contact Bodies	flat-1
Target Bodies	arm-2
Definition	
Type	Frictionless
Scope Mode	Manual
Behavior	Program Controlled
Trim Contact	Program Controlled
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Program Controlled
Detection Method	Program Controlled
Penetration Tolerance	Program Controlled
Interface Treatment	Add Offset, No Rampi...
Offset	0. mm
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Program Controlled
Stabilization Damping Factor	0.
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None

图 8-10　法向接触刚度

法向接触刚度是影响精度和收敛行为的重要参数，刚度越大，结果越精确，收敛变得较困难。如果接触刚度太多，模型会振动，接触面会相互弹开，如图 8-11 所示。

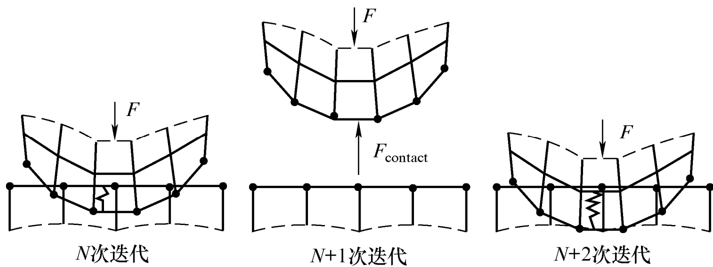


图 8-11　法向接触刚度影响

在 Mechanical 系统中法向接触刚度默认为自动设置，在设置时可输入 Normal Stiffness Factor（FKN），它是计算刚度代码的乘积，因子越小，接触刚度就越小。

接触问题中法向接触刚度选择的一般准则如下：

✧ 对于绑定和不分离的接触，默认 FKN=10。

✧ 对于其他形式的接触，默认 FKN=1.0。

✧ 体积为主的问题：用 Program Controlled 或手动输入 Normal Stiffness Factor 为 1。

✧ 弯曲为主的问题：手动输入 Normal Stiffness Factor 为 0.01～0.1 的数值。

5．接触工具

在 Mechanical 中使用【Contact Tool】产生接触结果，结果包括“压力（Pressure）”

“Penetration（穿透）”“Gap（间隙）”“Frictional Stress（摩擦应力）”“Sliding Distance（滑移距离）”“Status（接触状态）” 和 “Fluid Pressure（流体压力）”。

单击【Solution】工具栏上的【Tools】|【Contact Tool】命令，在【Outline（分析树）】中的【Solution（A6）】节点下增加【Contact Tool】选项，如图 8-12 所示。

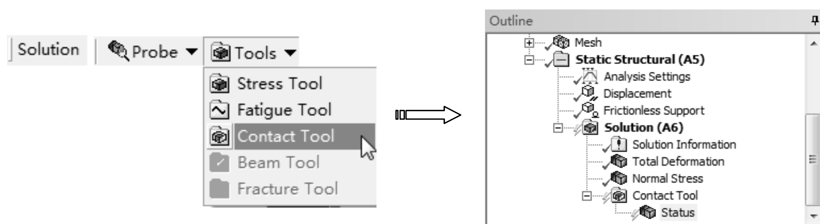


图 8-12　启动【Contact Tool】项

在详细设置窗口的【Type】下拉列表中选择 Pressure，然后选中【Pressure】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，图形区显示压力分布，如图 8-13 所示。

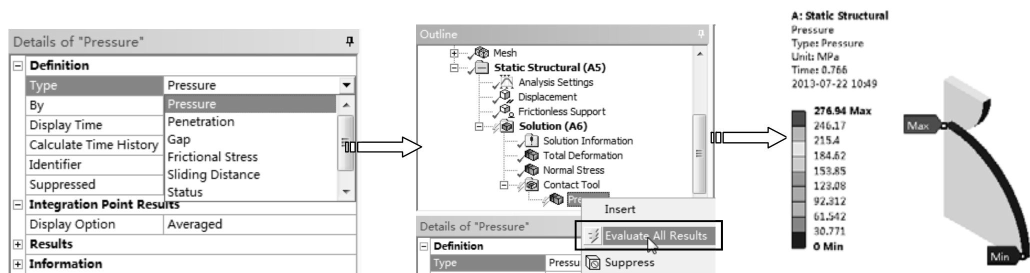


图 8-13　接触压力分布

8.2　实例 1——夹钳大变形分析

8.2.1　实例说明

本例中通过一个夹钳为例讲解大变形静力分析，夹钳一臂承受 3000N 力并弯曲，另一臂则置于刚性支撑上，如图 8-14 所示。

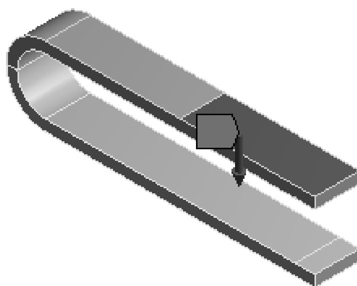


图 8-14　夹钳结构

8.2.2 分析思路

本例是一个夹钳大变形的几何非线性分析，利用 ANSYS Workbench 进行静力学分析完成，设置分析中的【Large Deflection】为 On，打开大变形分析，以获得大变形分析结果。

8.2.3 具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 8-15 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 8-16 所示。

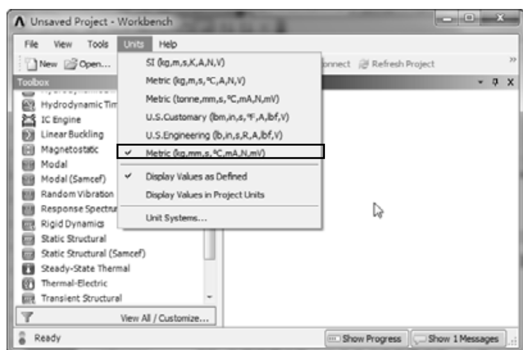


图 8-15 设置分析单位



图 8-16 创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 8-17 所示。

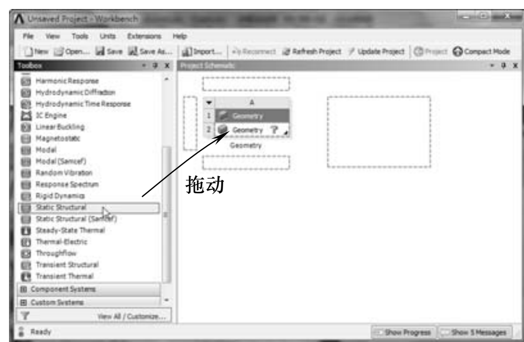




图 8-17 创建分析项目 B

2. 导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|

【Browse】命令，如图 8-18 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter08\8.2\uncompleted\clamp.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏中【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 8-19 所示。

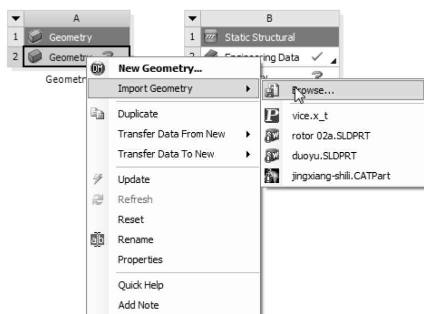


图 8-18　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

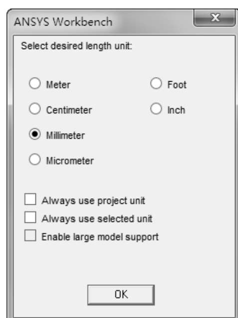


图 8-19　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 8-20 所示。

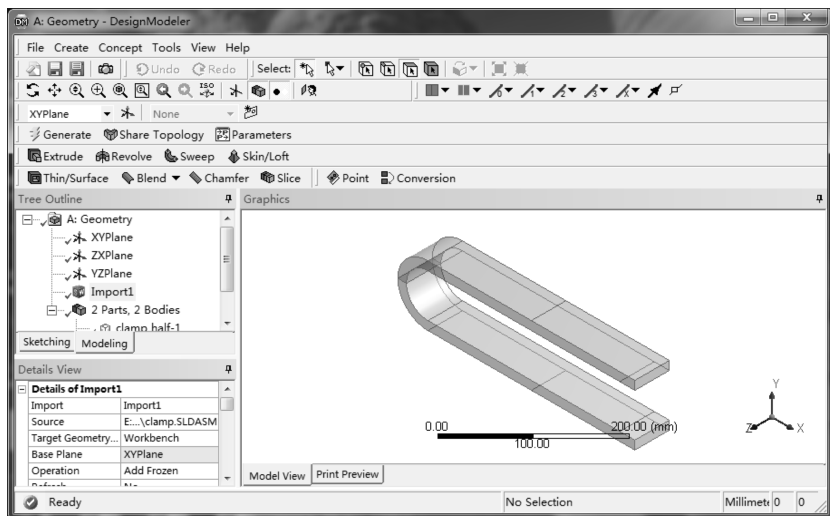


图 8-20　生成几何体后的 DesignModeler 界面

5）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 X 按钮，退出 DesignModeler，返回到 Workbench 主界面。

6）单击 💾 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入如图 8-21 所示的材料参数设置界面。

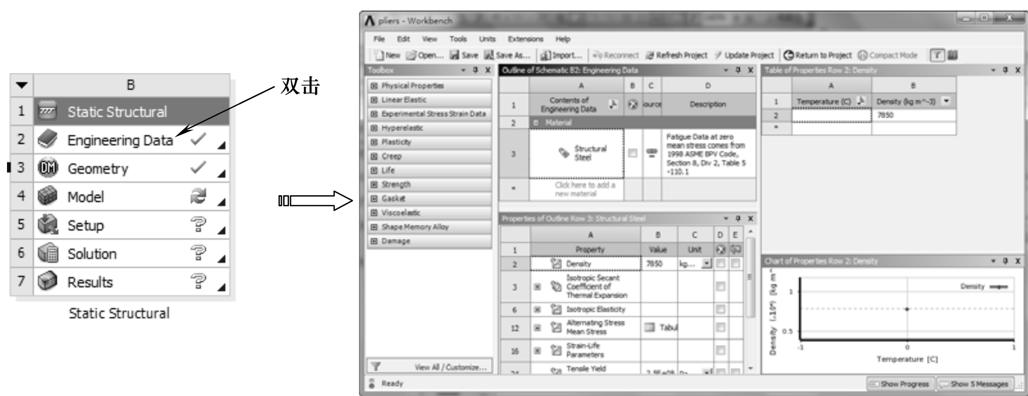


图 8-21　双击【Engineering Data】选项

2）在界面的空白处任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，原界面窗口中的【Outline of Schematic B2：Engineering Data】窗口消失，取代以【Engineering Data Sources（工程数据源）】和【Outline of Favorite（优先列表）】窗口，如图 8-22 所示。

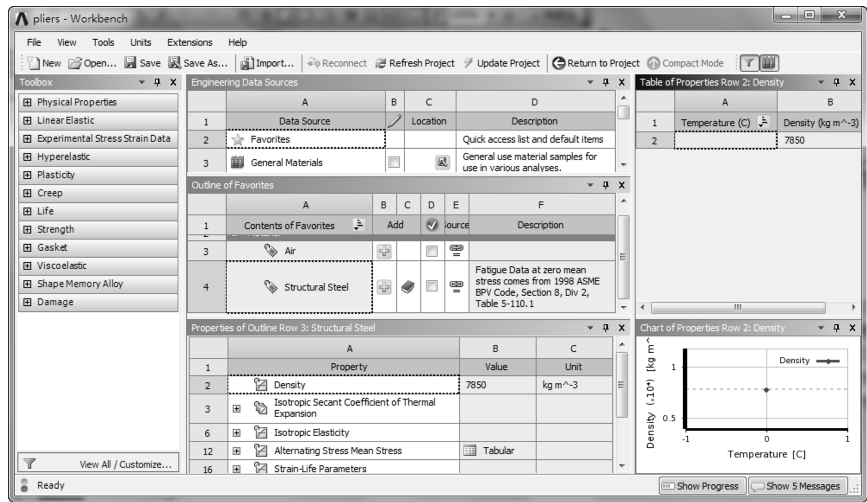


图 8-22　材料参数设置界面

3）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中 A3 栏中的【General Materials（通用材料）】项，出现【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口，如图 8-23 所示。

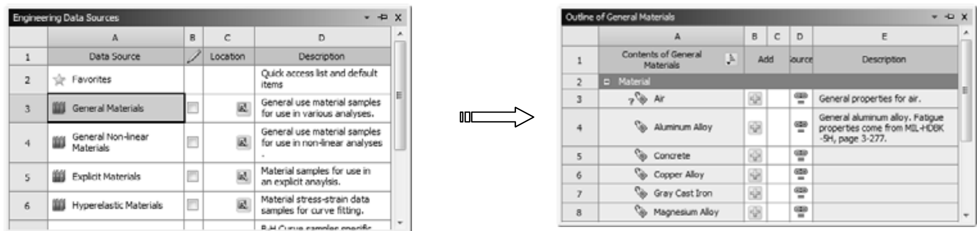


图 8-23　选择 General Materials 材料

4）在【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口中单击 B4 栏的按钮，此时在 C4 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 8-24 所示。

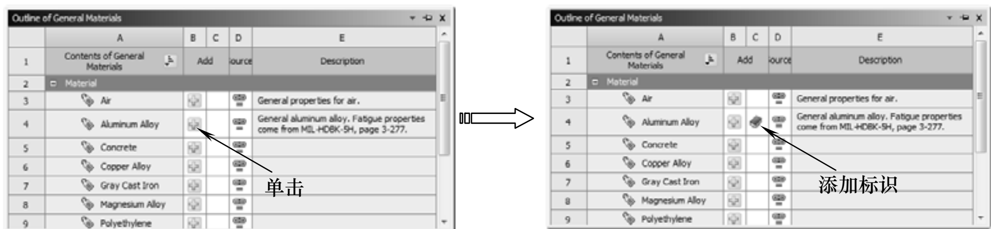


图 8-24　添加 Aluminum Alloy

5）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口并显示添加的材料。

6）单击【Return to Project】按钮 Return to Project ，返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 8-25 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 8-26 所示。

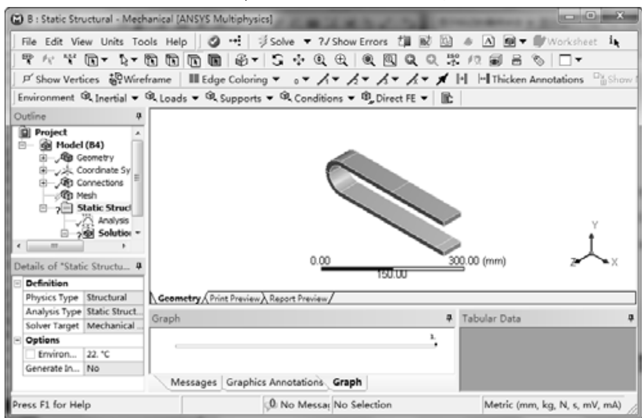


图 8-25　Mechanical 用户界面

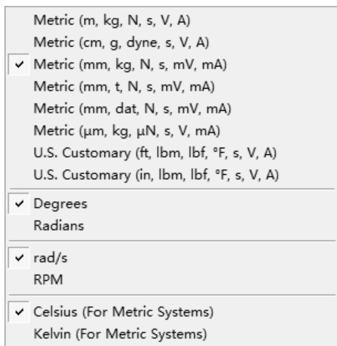


图 8-26　设置分析单位

3）单击窗口左侧【Outline（分析树）】中【Geometry】节点下的【clamp half-1】和【clamp half-2】，此时在【Details of “Multiple Selection”】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击 ▸ 按钮，选择【Aluminum Alloy】项，将材料设置为铝合金，如图 8-27 所示。

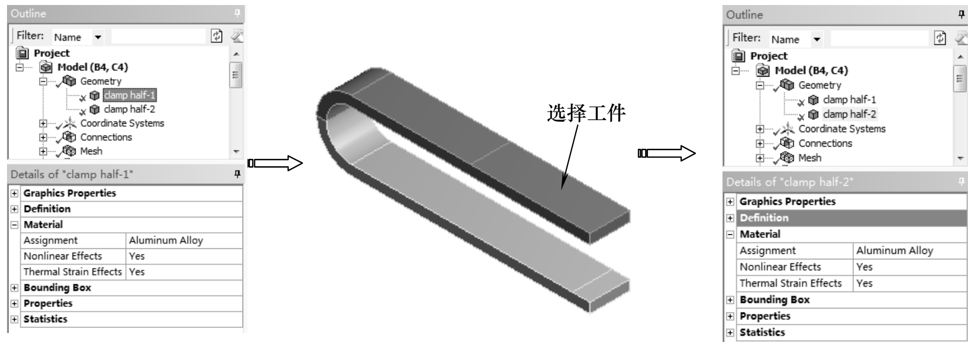


图 8-27　设置工件材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 8-28 所示。

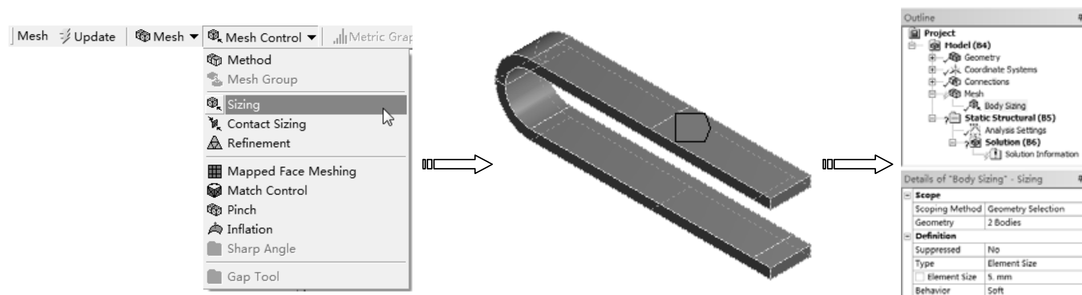


图 8-28　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 8-29 所示。

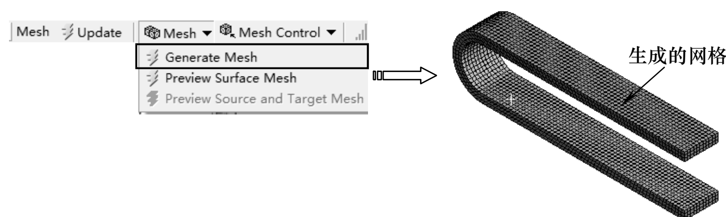


图 8-29　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令。单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，接着选择表面，最后单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 8-30 所示。

2）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-31 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 3000，如图 8-31 所示。

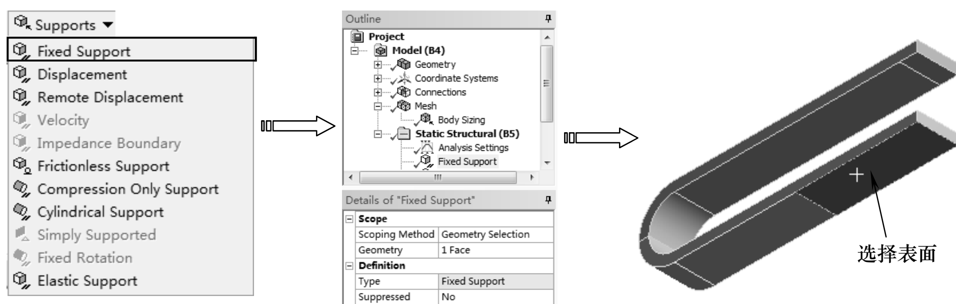


图 8-30　施加固定约束

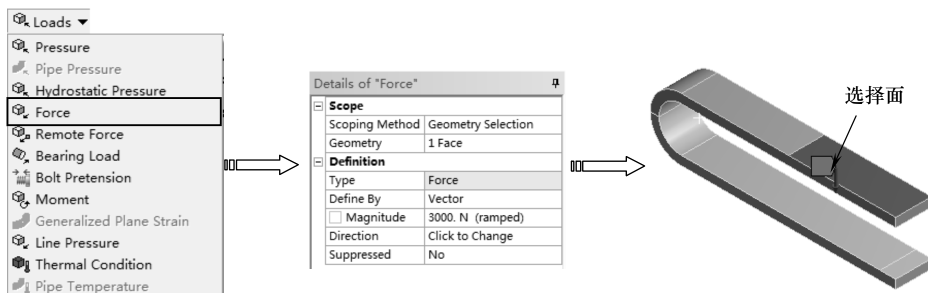


图 8-31　施加力

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 8-32 所示。

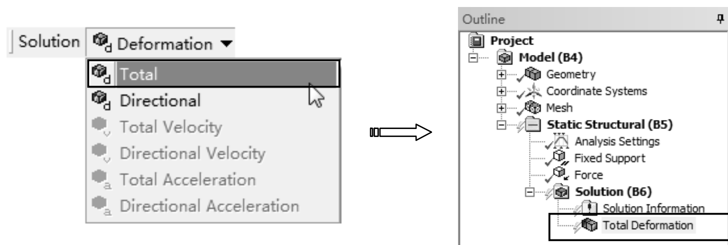


图 8-32　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 8-33 所示。

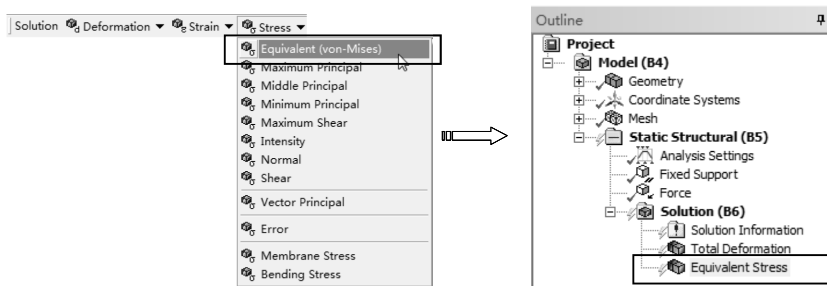


图 8-33　添加应力求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解。系统弹出进度条，表示正在求解，求解完成后进度条自动消失。

2）应变云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出应变云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应变云图，如图 8-34 所示。

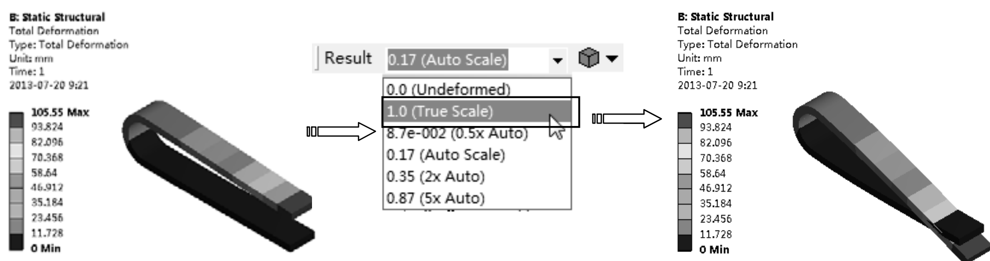


图 8-34　应变云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 8-35 所示。

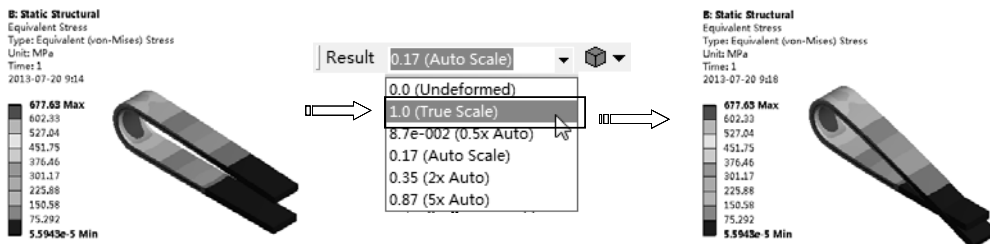


图 8-35　应力云图

提示：从变形图中可以看出，加载臂穿过了固定壁，很明显发生了大变形，分析结果会存在误差。

4）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮 x，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

9．开启大变形求解分析

1）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B4 栏的【Setup】项上，当 B4 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 8-36 所示。

2）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C5 栏的【Setup】项，进入 Mechanical 界面。在【Outline（分析树）】中选择【Analysis Settings】节点，在窗口下方的详细设置窗口中设置【Large Deflection】为 On，如图 8-37 所示。

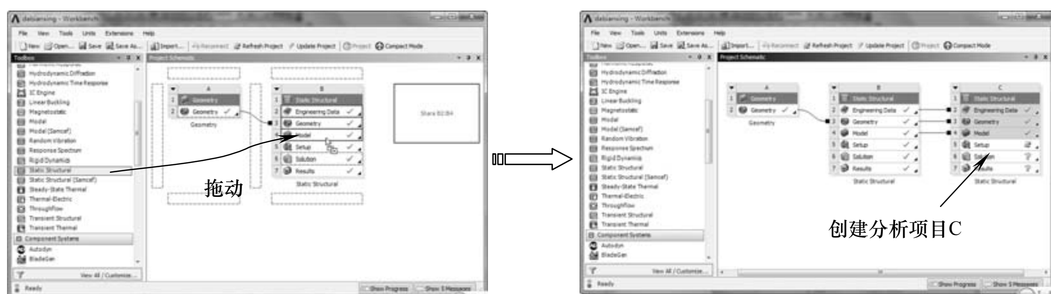


图 8-36　创建分析项目 C

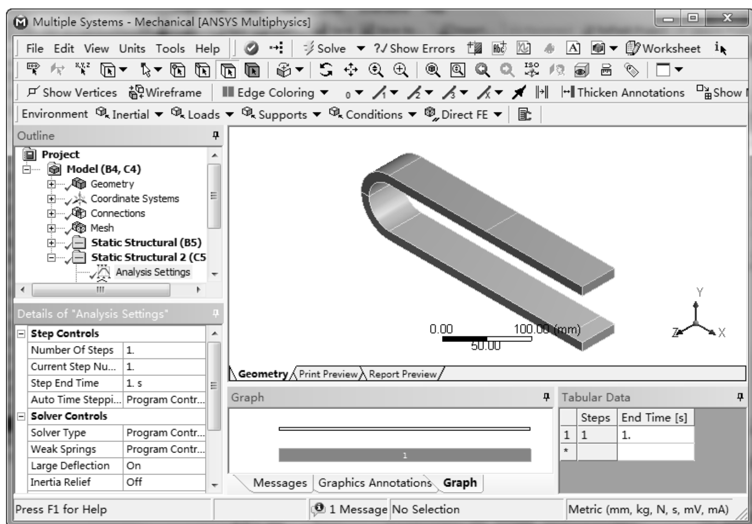


图 8-37　Mechanical 界面

3）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令。单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-38 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 8-38 所示。

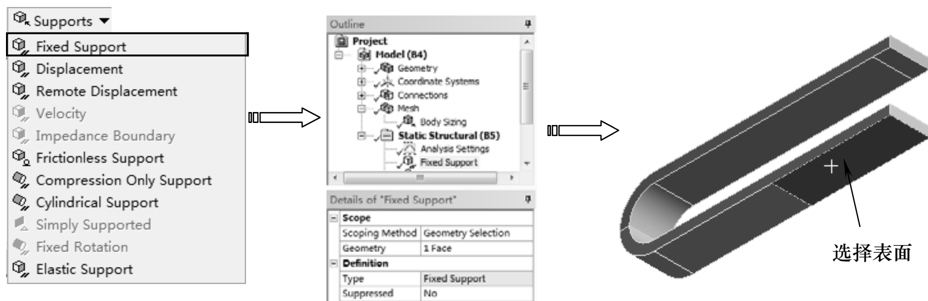


图 8-38　施加固定约束

4）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，

在【Details of“Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-39 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 3000，如图 8-39 所示。

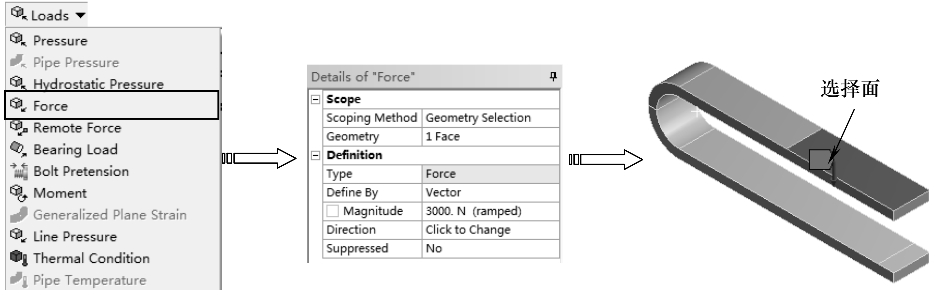


图 8-39　施加力

5）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

6）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 8-40 所示。

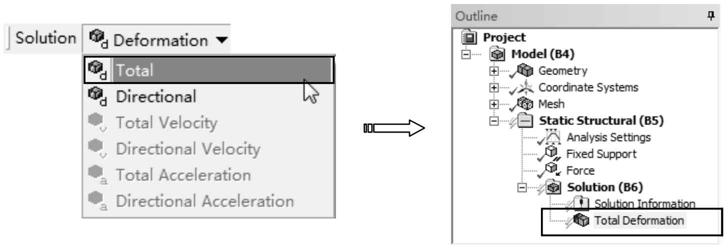


图 8-40　添加变形求解项

7）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 8-41 所示。

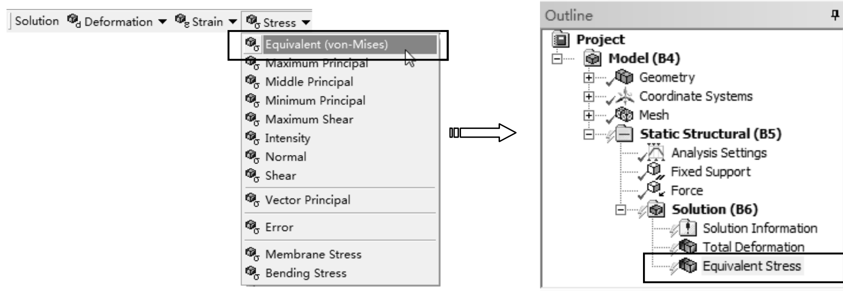


图 8-41　添加应力求解项

8）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解。系统弹出进度条，表示正在求解，求解完成后进度条自动消失。

9）变形云图。为了便于分析不同设置结果，可使用多窗口功能。单击【Vertical Viewports】按钮，模型空间自动分割成两个，分别设置每个窗口中的内容，如图 8-42 所示。

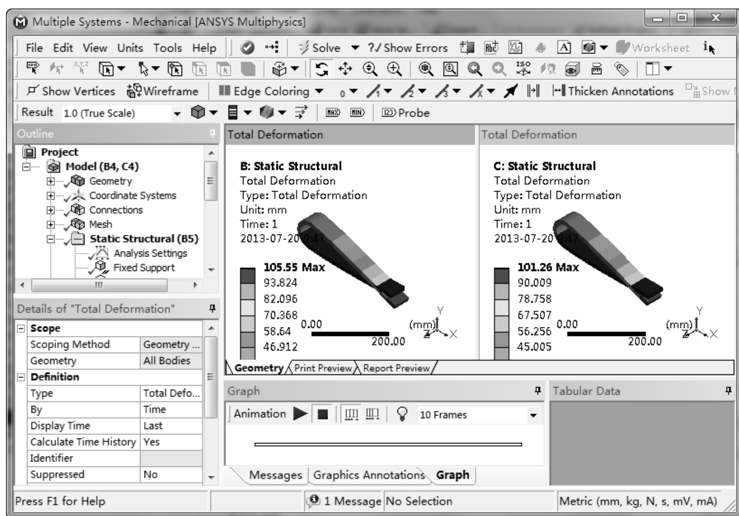


图 8-42　变形云图

10）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale)】项，可真实显示应力云图，如图 8-43 所示。

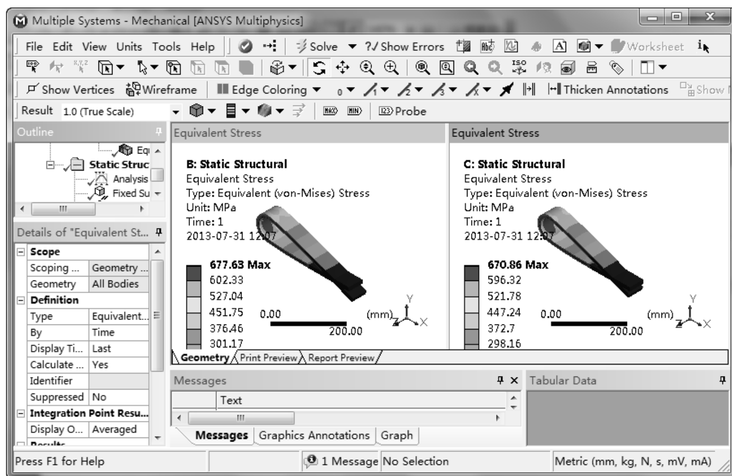


图 8-43　应力云图

10．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

8.2.4　实例总结

本节以夹钳为例讲解了 ANSYS Workbench 的几何非线性有限元分析方法和具体应用步

骤，读者在学习过程中需要注意的是：几何非线性分析中可通过启动【Large Deflection】选项来进行大变形分析，通常用于典型的细长结构，横向位移超过长度的 10%的场合。

8.3 实例 2——套杆静态接触分析

8.3.1 实例说明

本例中通过套杆为例讲解静态接触分析，套端部作用 5MPa 的拉力，试分析套和杆接触应力，如图 8-44 所示。

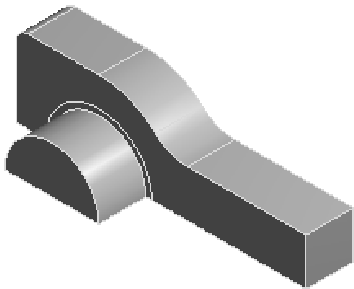


图 8-44 套杆结构

8.3.2 分析思路

本例是典型的静态接触非线性分析，为了简化分析采用对称建模，在对称面上施加无摩擦约束条件，设置套和杆之间为无摩擦接触，然后利用接触工具求解接触压力的分布。

8.3.3 具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 8-45 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 8-46 所示。

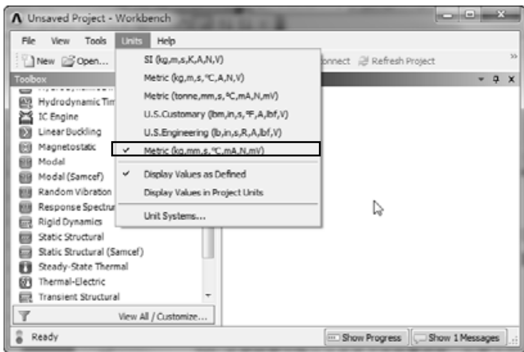


图 8-45 设置分析单位

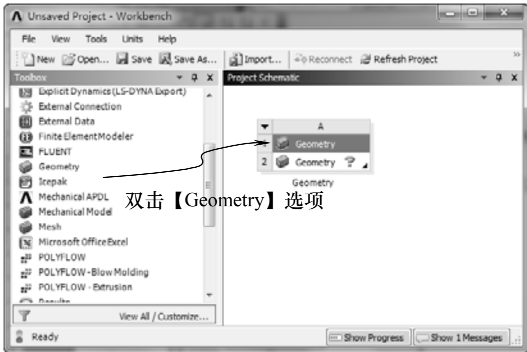


图 8-46 创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色

高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 8-47 所示。

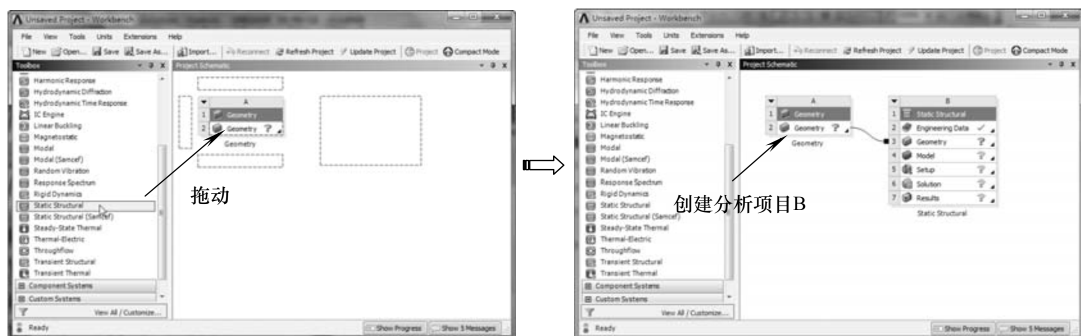


图 8-47　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 8-48 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter08\8.3\uncompleted\套杆装配体.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 8-49 所示。

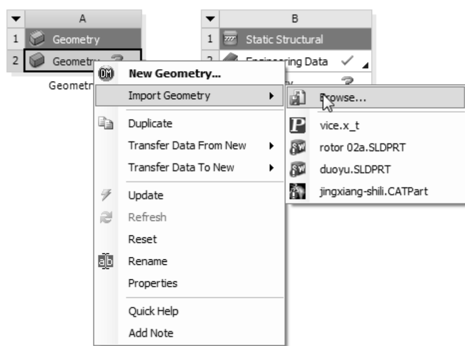


图 8-48　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

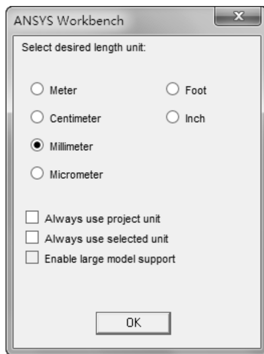


图 8-49　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 8-50 所示。

5）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 X 按钮，退出 DesignModeler，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

6）单击保存按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

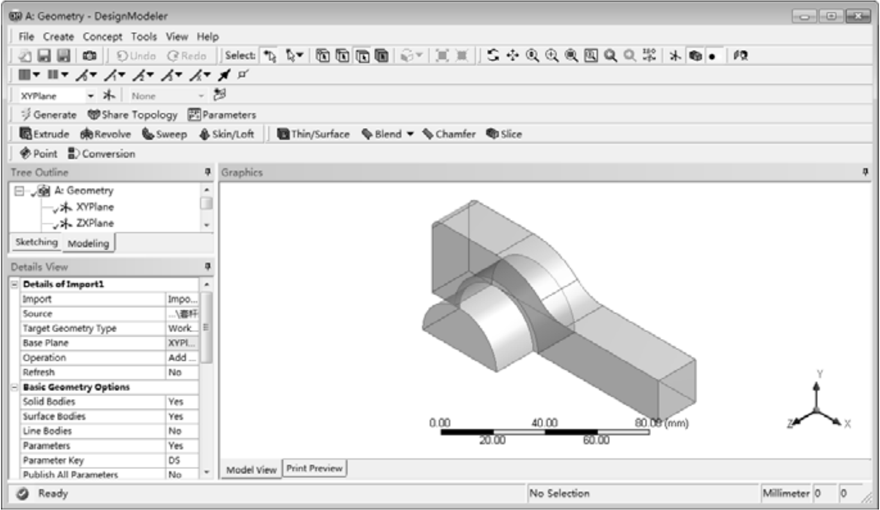


图 8-50　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．创建接触

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）展开窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】|【Contact Region】节点，在详细设置窗口中将【Type】从 Bonded 更改为 Frictionless，如图 8-51 所示。

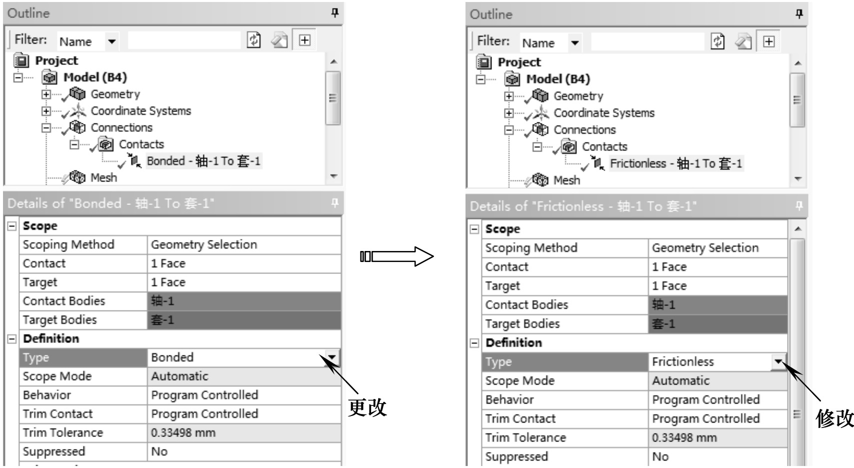


图 8-51　修改接触类型

6．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control

（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 8-52 所示。

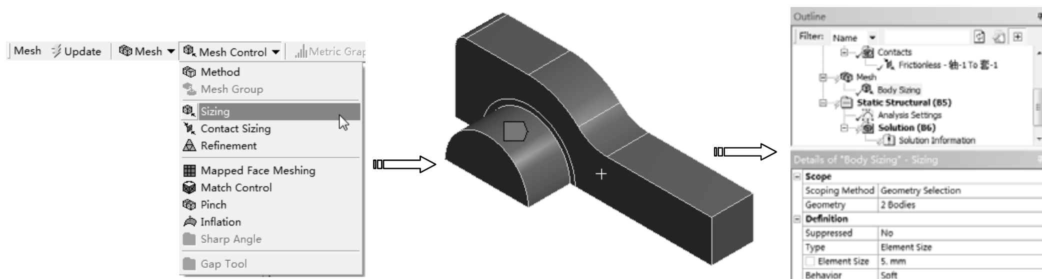


图 8-52　设置网格尺寸

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 8-53 所示。

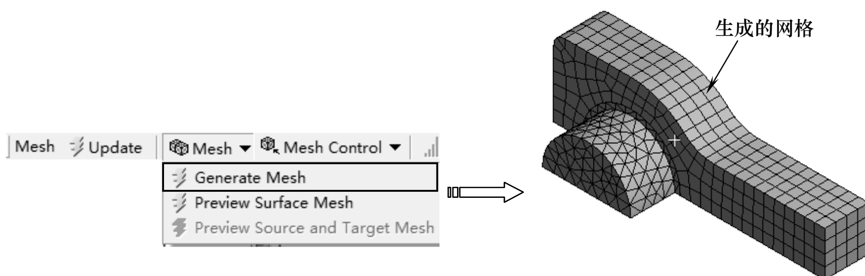


图 8-53　生成网格

7．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令。单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图8-54所示表面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图8-54所示。

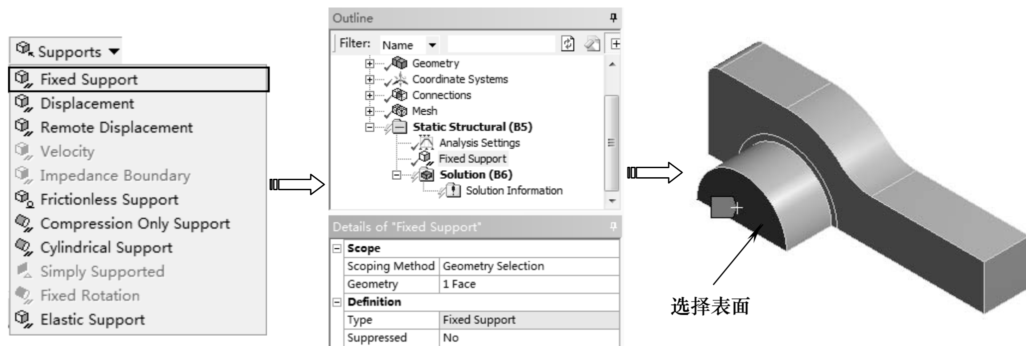


图 8-54　施加固定约束

2）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Frictionless Support】命令。单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在详细设置窗口中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-55 所示 3 个面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 8-55 所示。

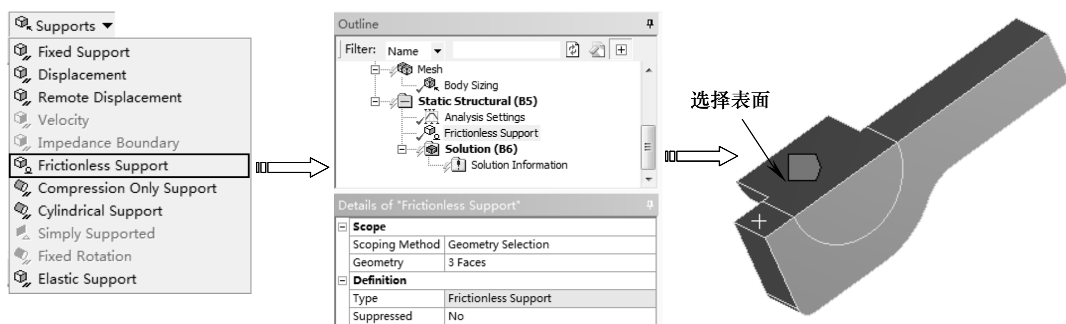


图 8-55　施加无摩擦约束

3）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Displacement】命令。单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在详细设置窗口中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-56 所示的面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Z Component】文本框中输入 0，如图 8-56 所示。



图 8-56　施加位移约束

4）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Pressure】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在详细设置窗口中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 8-57 所示表面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入-5MPa，如图 8-57 所示。

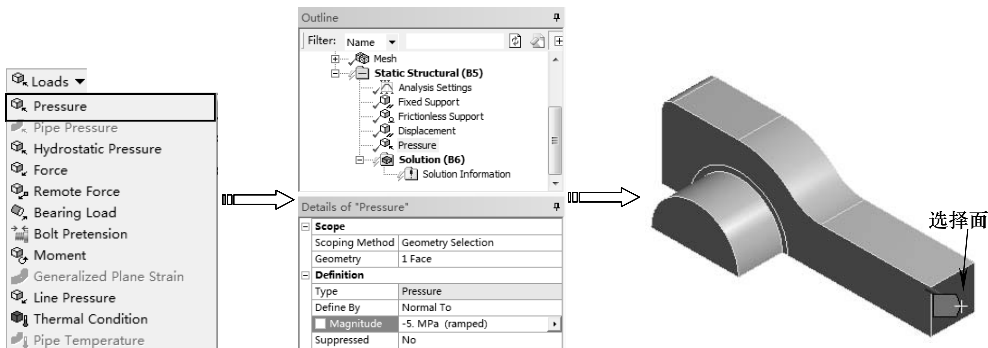


图 8-57　施加压力

8．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 8-58 所示。

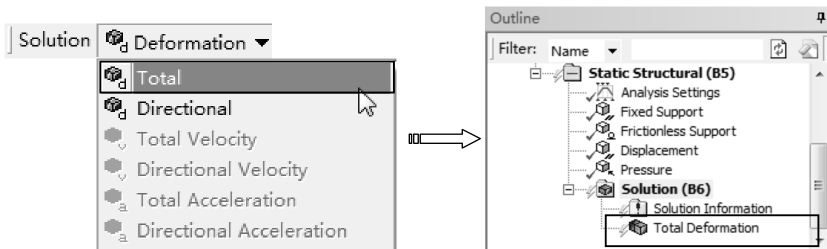


图 8-58　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 8-59 所示。

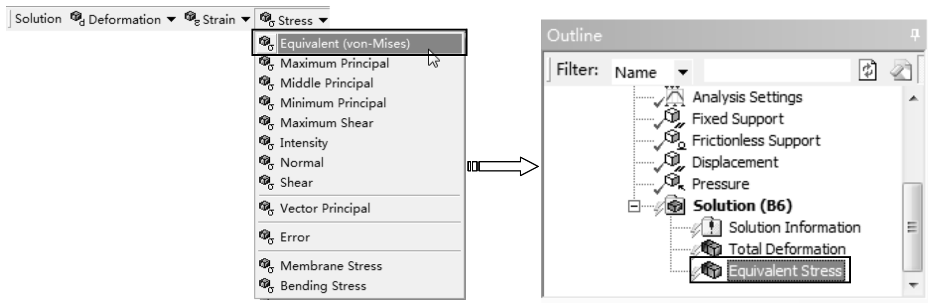


图 8-59　添加应力求解项

9．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解。系统弹出进度条，表示正在求解，求解完成后进度条自动消失。

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total

Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 8-60 所示。

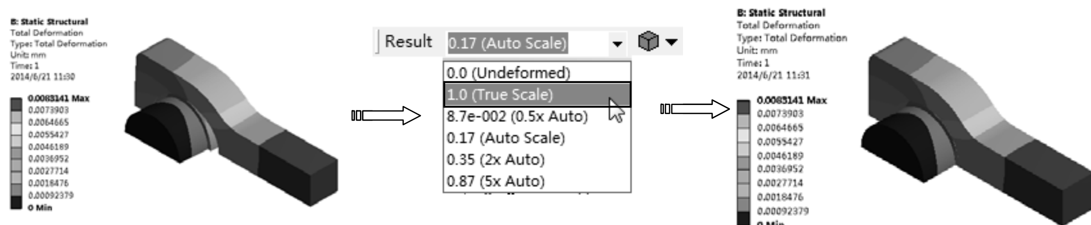


图 8-60　变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 8-61 所示。

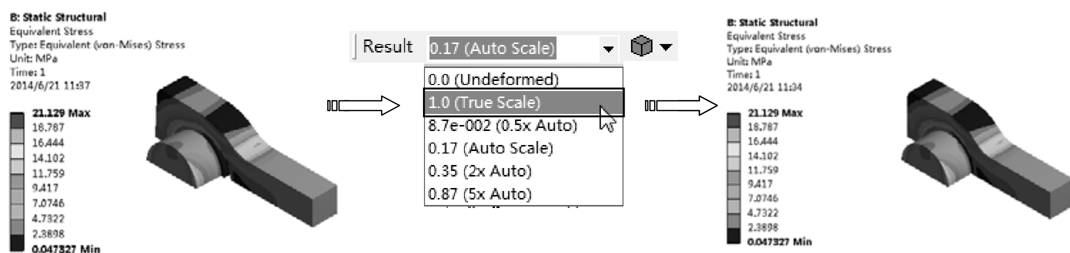


图 8-61　应力云图

4）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Tools】|【Contact Tool】命令，在【Solution】下增加【Contact Tool】节点，选择如图 8-62 所示的两个实体作为接触对象。

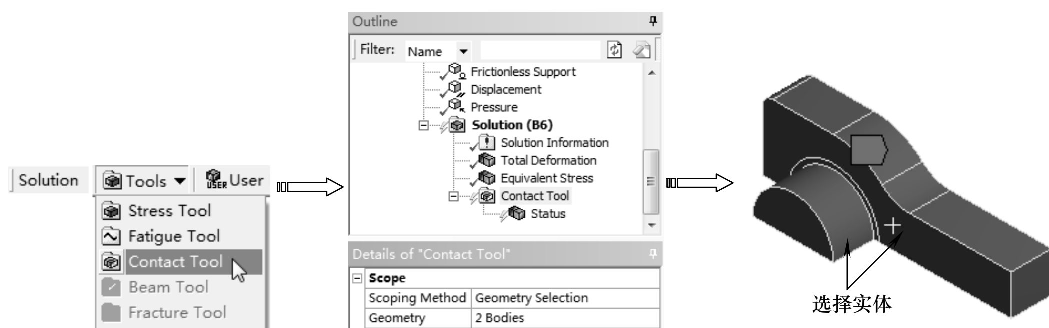


图 8-62　启动接触工具

5）选中【Contact Tool】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，然后单击【Contact Tool】项下的【Status】节点，显示接触状态云图，如图 8-63 所示。

6）选中【Contact Tool】节点下的【Status】选项，然后在详细设置窗口中选择【Type】

为 Pressure，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，然后单击【Contact Tool】项下的【Pressure】节点，显示接触压力云图，如图 8-64 所示。

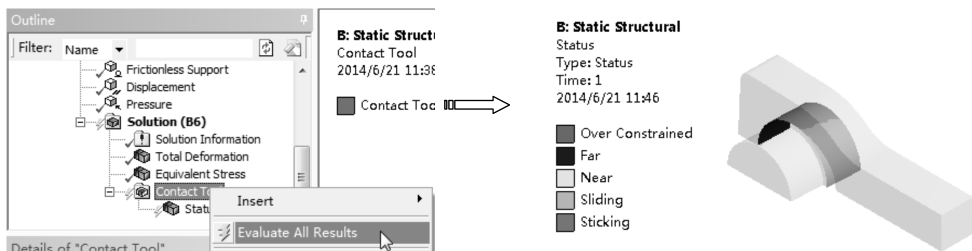


图 8-63　接触状态分析云图

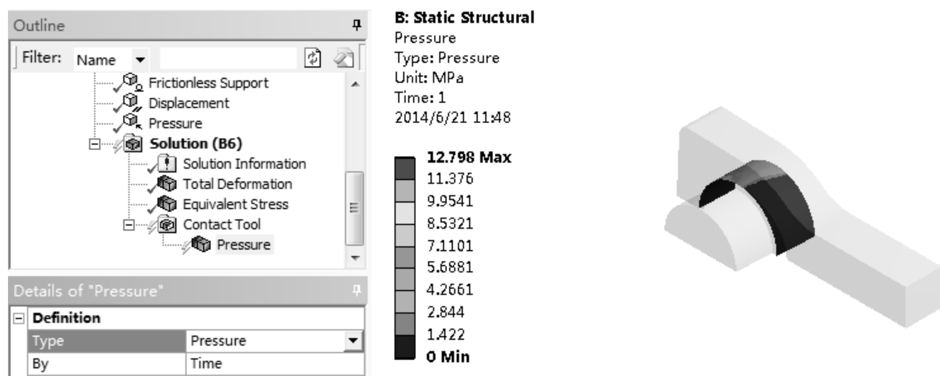


图 8-64　接触压力云图

10. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save 保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

8.3.4　实例总结

本节以套杆为例讲解了 ANSYS Workbench 的静态接触非线性有限元分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：接触非线性中要设置接触条件，然后可利用 Contact Tool 工具求得接触状态、接触压力等接触结果。

8.4　实例 3——轴盘动态接触分析

8.4.1　实例说明

本例中通过轴盘过盈配合为例讲解接触分析，盘内孔为 59mm，轴外径为 60mm，试分

析其过盈配合时的应力和变形，如图 8-65 所示。

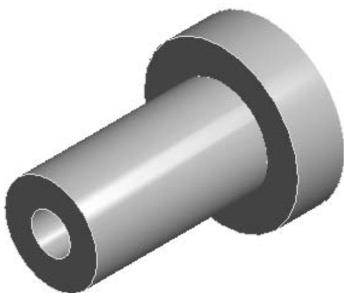


图 8-65　轴盘结构

8.4.2　分析思路

本例是典型的轴盘过盈配合的接触非线性分析，为了模拟轴盘装配情况，采用瞬态动力学分析方法，通过施加位移约束来模拟盘在装配过程中的移动过程，设置【Large Deflection】为 On，打开大变形分析以获得大变形分析结果。

8.4.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 8-66 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 8-67 所示。

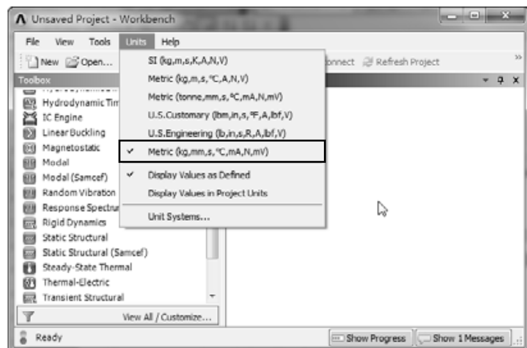


图 8-66　设置分析单位

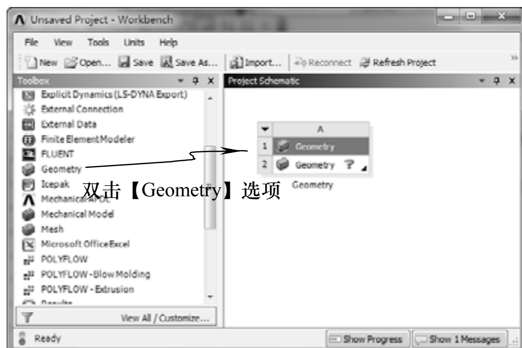


图 8-67　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Transient Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 8-68 所示。

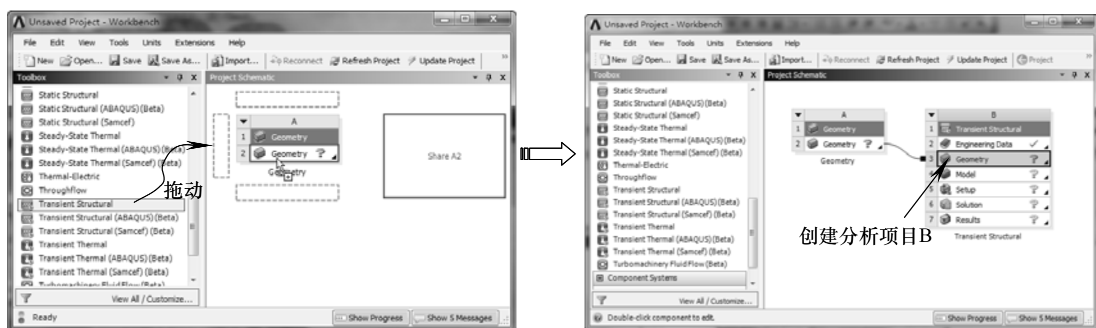


图 8-68　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 8-69 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter08\8.4\uncompleted\guoying.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 8-70 所示。

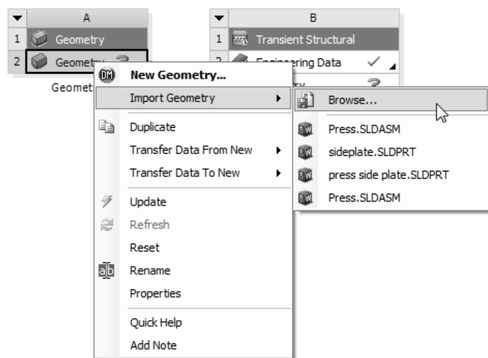




图 8-69　选择【Import Geometry】|【Browse】命令　　　图 8-70　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 ⚡Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 8-71 所示。

5）单击 💾 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

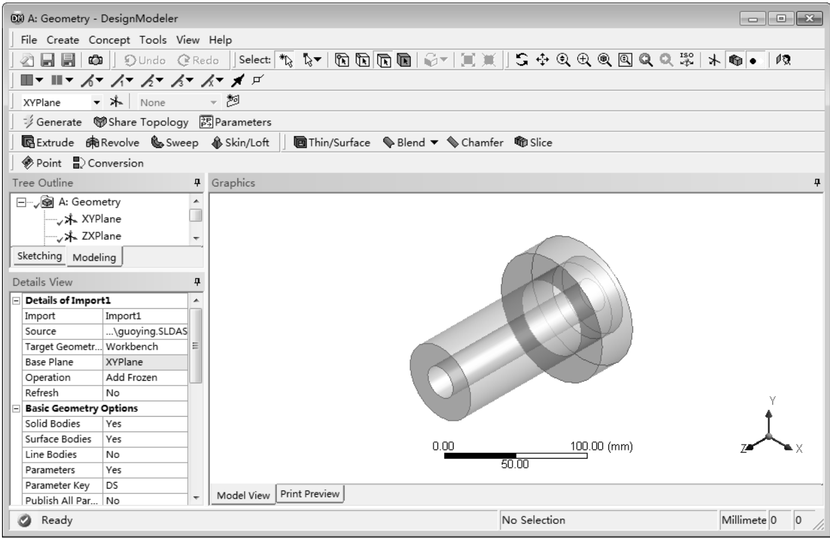


图 8-71　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．创建接触

1）单击窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】节点，弹出【Connections】工具栏。

2）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】节点，单击【Connections】工具栏上的【Contact】|【Frictionless】命令，分析树中增加【Frictionless-No Selection To No Selection】节点。

3）选择【zhou-1】节点的外表面，单击【Contact】节点下的【Apply】按钮，如图 8-72 所示。

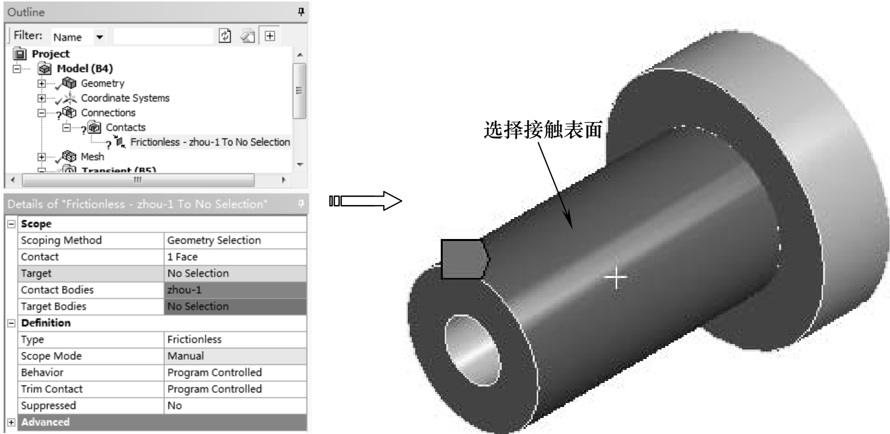


图 8-72　选择接触表面

4）选择【pan-1】节点的表面，单击【Target】节点下的【Apply】按钮，如图 8-73 所示。

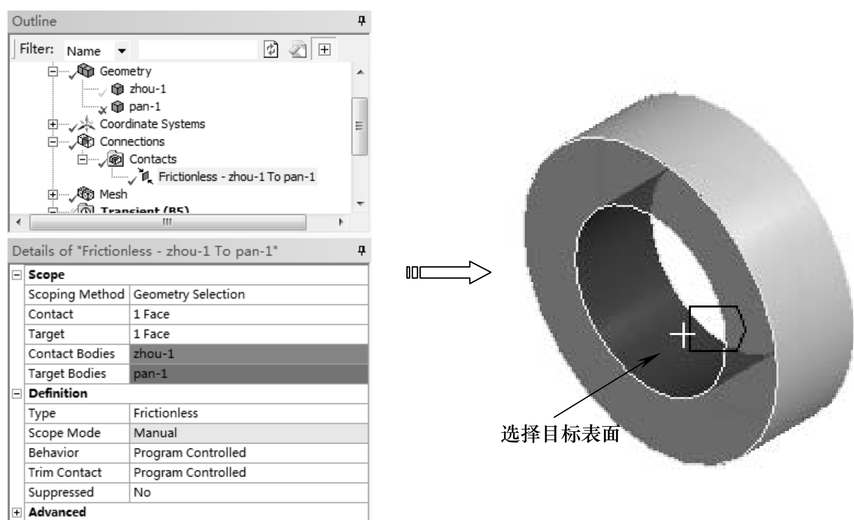


图 8-73　选择目标表面

提示：选择时，可在分析树的【Geometry】节点下的各实体中单击右键，在弹出的快捷菜单中选择【Show Body】或【Hide Body】命令显示隐藏实体。

6．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Element Size】文本框中输入 10mm，如图 8-74 所示。

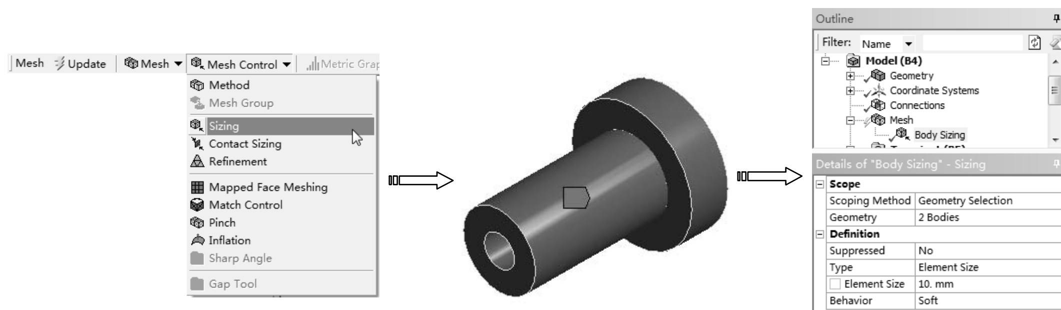


图 8-74　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当

网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 8-75 所示。

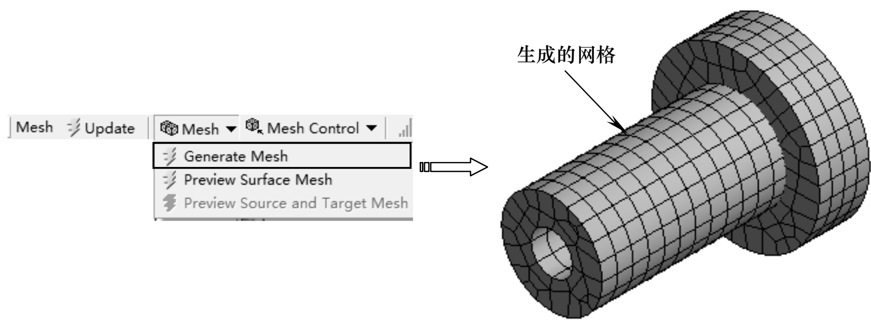
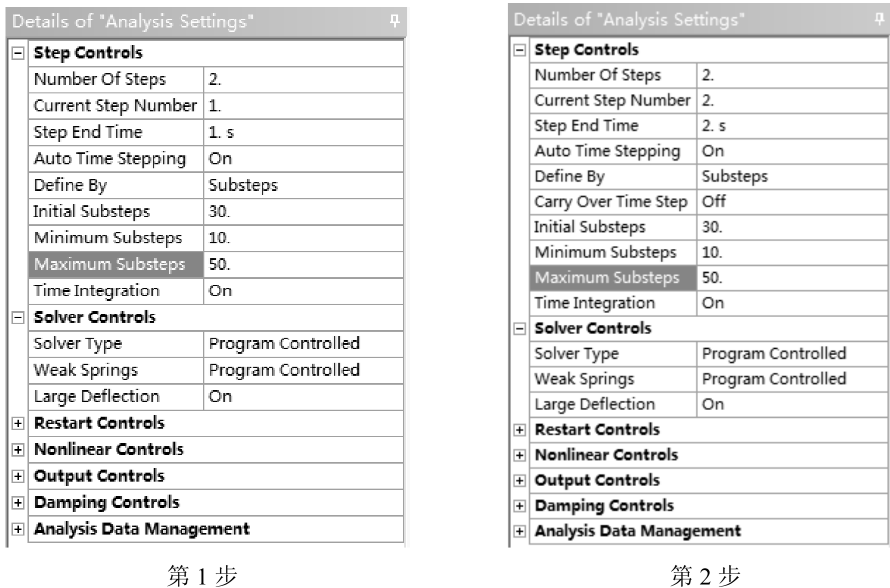


图 8-75　生成网格

7．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点下的【Analysis Settings】选项，在【Detail of“Analysis Settings”】详细设置窗口中分别设置两个求解步，如图 8-76 所示。



Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	2.
Current Step Number	1.
Step End Time	1. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Initial Substeps	30.
Minimum Substeps	10.
Maximum Substeps	50.
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	

第 1 步

Details of "Analysis Settings"

Step Controls	
Number Of Steps	2.
Current Step Number	2.
Step End Time	2. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Substeps
Carry Over Time Step	Off
Initial Substeps	30.
Minimum Substeps	10.
Maximum Substeps	50.
Time Integration	On
Solver Controls	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Program Controlled
Large Deflection	On
Restart Controls	
Nonlinear Controls	
Output Controls	
Damping Controls	
Analysis Data Management	

第 2 步

图 8-76　设置求解步

2）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

3）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择底面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 8-77 所示。

4）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Displacement】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选

择如图 8-78 所示上表面。最后，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Tabular Data】表格中输入如图 8-78 所示的数值。

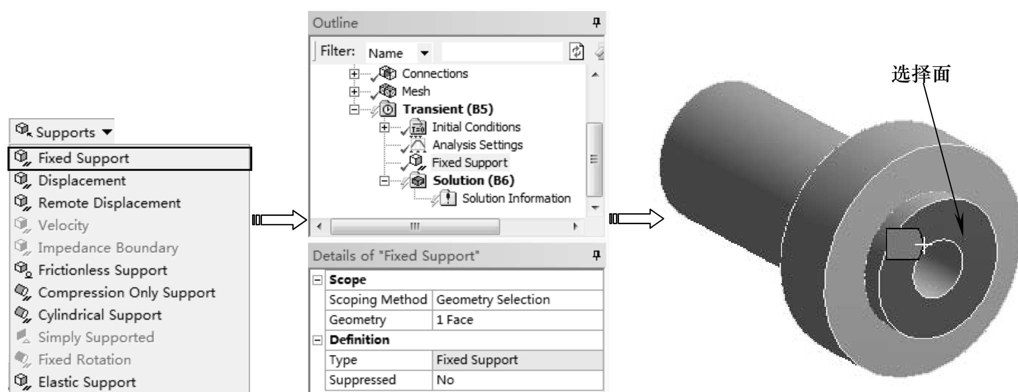


图 8-77　施加固定约束



图 8-78　施加位移

8．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional】命令，此时在分析树中插入【Directional Deformation】项，如图 8-79 所示。

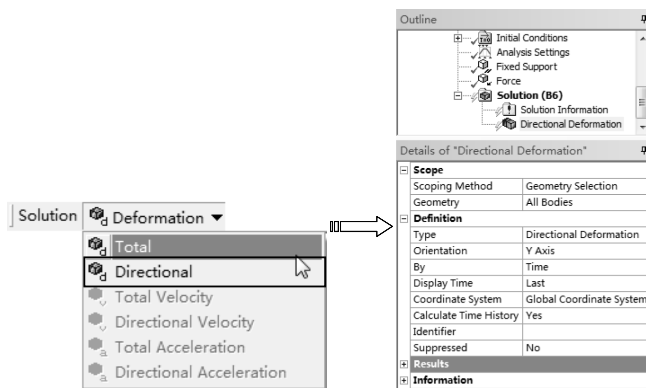


图 8-79　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 8-80 所示。

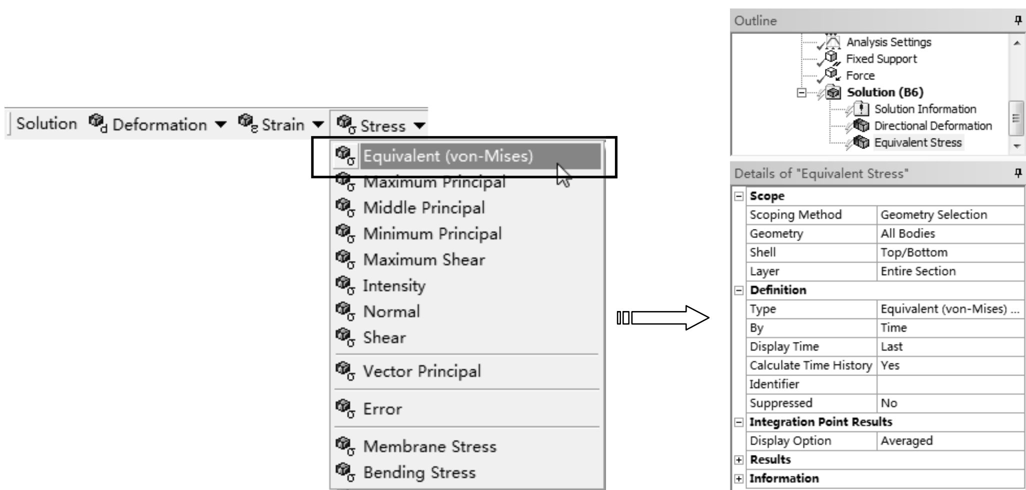


图 8-80　添加应力求解项

9. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 8-81 所示。

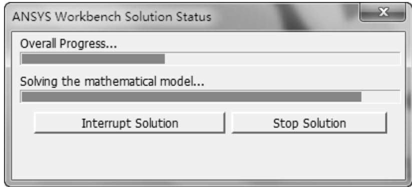


图 8-81　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Deformation】项 Directional Deformation，在图形窗口显示出变形云图，同时显示最大最小方向变形，如图 8-82 所示。

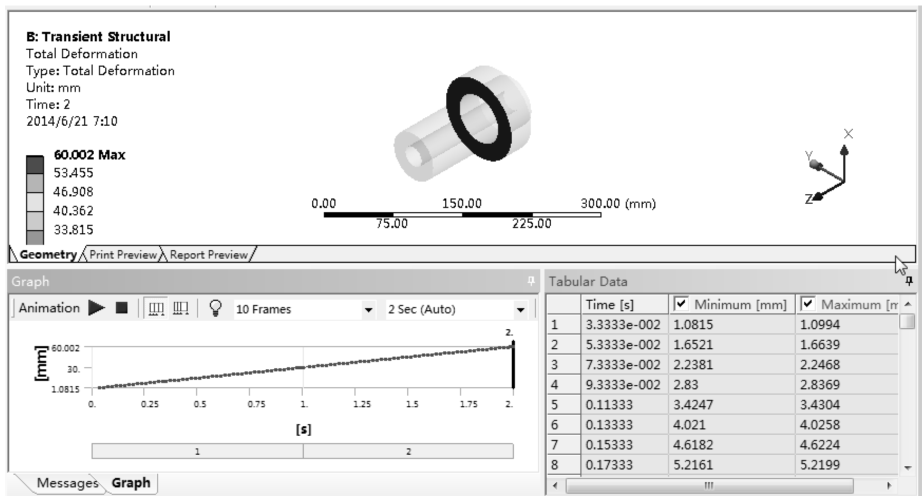
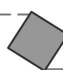
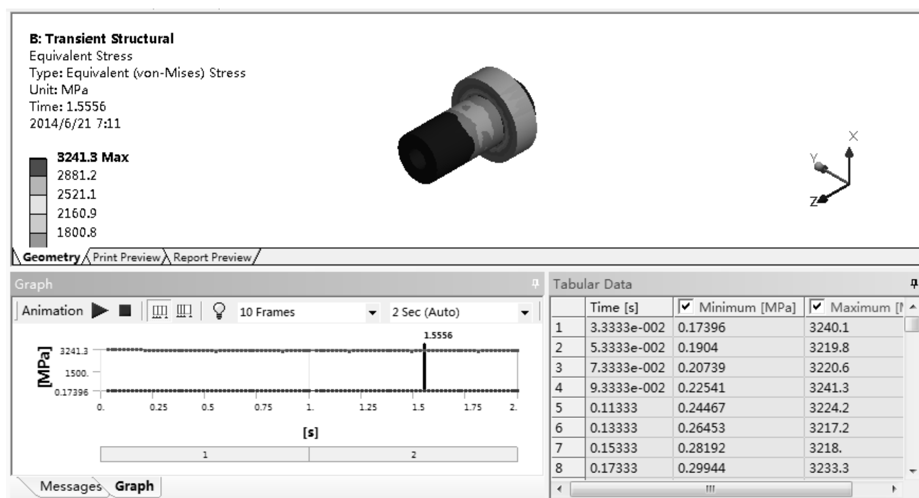


图 8-82　变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的

【Equivalent Stress】项，在图形窗口显示出应力云图，同时显示最大和最小应力，如图 8-83 所示。



	Time [s]	Minimum [MPa]	Maximum [M
1	3.3333e-002	0.17396	3240.1
2	5.3333e-002	0.1904	3219.8
3	7.3333e-002	0.20739	3220.6
4	9.3333e-002	0.22541	3241.3
5	0.11333	0.24467	3224.2
6	0.13333	0.26453	3217.2
7	0.15333	0.28192	3218.
8	0.17333	0.29944	3233.3

图 8-83　应力云图

4）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Tools】|【Contact Tool】命令，在【Solution】下增加【Contact Tool】节点，选择如图 8-84 所示的表面作为接触分析表面。

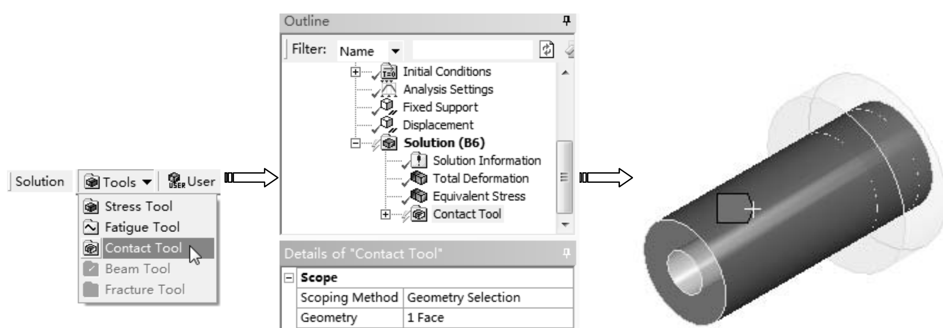


图 8-84　启动接触工具

5）选中【Contact Tool】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，然后单击【Contact Tool】项下的【Status】节点，显示接触状态云图，如图 8-85 所示。

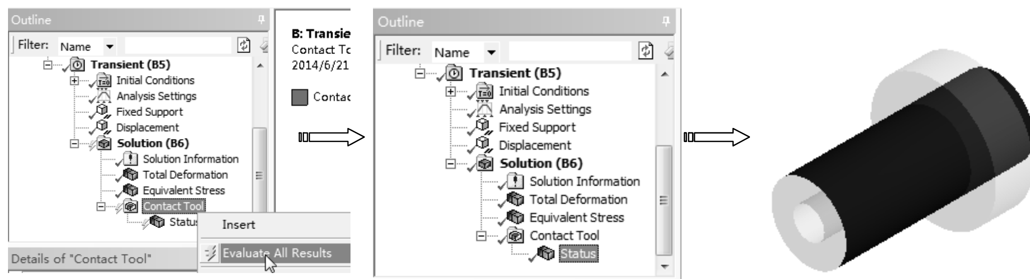
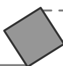


图 8-85　接触状态分析云图



10．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save ，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

8.4.4 实例总结

本节以轴盘为例讲解了 ANSYS Workbench 的接触非线性有限元分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意以下几点：

1）接触分析中需要通过【Connections】工具栏上【Contact】选项下的相关命令添加接触类型，然后利用 Contact Tool 工具来得到接触分析结果。

2）对于过盈配合的有限元模拟需要利用 Transient Structural 分析来模拟装配过程中零件的移动过程。

8.5 本章小结

本章首先介绍了 ANSYS 14.5 Workbench 软件的结构非线性分析的基础知识，然后通过典型案例介绍了结构非线性的实际应用，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。读者学习后举一反三，将能够使用 ANSYS Workbench 完成各种项目的结构非线性分析。

第 9 章　ANSYS 14.5 Workbench 屈曲分析实例

屈曲分析就是通常所说的稳定性分析，一般分为线性屈曲分析和非线性屈曲分析。本章通过典型案例对屈曲分析的操作方法进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。

9.1　屈曲分析概述

屈曲分析就是通常所说的稳定性分析，一般分为线性屈曲分析和非线性屈曲分析。线性屈曲分析通过【Linear Buckling】分析系统进行，而非线性屈曲分析则直接在结构静力分析系统中完成。

9.1.1　屈曲分析基础

屈曲是指在压力作用下的突然大变形，细长结构的物体受到一个轴向压缩载荷的作用，能在远小于引起材料失效的载荷水平下发生屈曲失效。屈曲分析主要用于研究结构在特定载荷下的稳定性以及确定结构失稳的临界载荷。

压杆稳定性是典型的线性屈曲问题。考察一根细长压杆，如图 9-1a 所示，当压力 P 不大时，即使作用一个横向干扰力使杆件发生微小的弯曲变形，如图 9-1b 所示。当干扰力撤去后，杆经过若干次振动后，仍恢复到原来的直线形状，这种保持原有直线形状的平衡是稳定的平衡。当压力 P 增大到某一数值 P_{cr} 时，稍受横向力的干扰，杆即变弯，不再恢复原有的直线形状，而处于弯曲平衡状态；如 P 值再稍有增加，杆的弯曲变形显著增大，甚至最后造成破坏，这种不能保持原有直线形状的平衡是不稳定的平衡，如图 9-1c 所示。而压力 P 的极限值 P_{cr} 称为临界载荷。

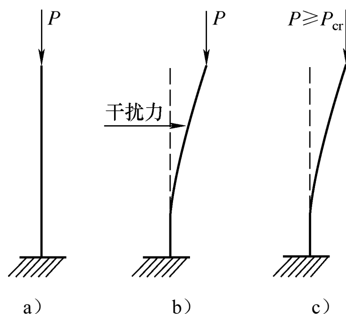


图 9-1　压杆稳定性

9.1.2 屈曲分析类型

屈曲分析有两种：线性屈曲分析和非线性屈曲分析。

线性屈曲是以特征值为研究对象，分析得到理想线性弹性结构的理论极限载荷，而不考虑实际结构中存在的缺陷和非线性，如非弹性的材料响应、几何大变形、接触行为等，也不考虑影响结构响应或使模型不对称的小缺陷，因此线性屈曲通常产生非保守的结果。

更准确地预测结构失稳的方法是进行非线性屈曲分析，需要静力分析时打开大变形，增量载荷加载求解，可以包括初始缺陷、塑性行为、间隙和大变形响应。相对于线性屈曲分析得到的临界载荷，考虑到缺陷和非线性影响而得到的实际屈曲载荷之比要低得多。

在进行线性和非线性屈曲分析时需要注意的问题有：

1）线性屈曲是非保守的，但由于比非线性屈曲计算省时，通常当做第一步计算来评估临界载荷，也就是屈曲开始时的载荷。线性屈曲分析可用于确定屈曲形态的设计工具。

2）在线性屈曲分析前必须进行结构静力学分析（Static Structural），以计算应力硬化矩阵。

3）线性屈曲分析计算得到的屈曲载荷因子（Buckling Load Factor），即特征值，将屈曲载荷因子乘以结构静力学分析时施加的载荷，即得到临界载荷。例如，在结构静力学分析中施加 50N 的压力载荷，而在线性屈曲分析计算中得到的屈曲载荷因子值为 100，则临界载荷为 5000N。为方便计算，一般在结构静力学分析时施加单位载荷。

4）一个结构有无穷多个屈曲载荷因子和相对应的屈曲模态，但一般只对低阶模态感兴趣，这是因为屈曲发生在高阶模态之前。

5）屈曲模态只表示振动模态的定性信息，而不是位移的实际大小。

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Static Structural】上按住鼠标左键，拖动到项目管理区，然后拖动【Linear Buckling】到【Static Structural】项目，即可创建屈曲分析项目。按照分析项目从上到下的顺序执行屈曲分析，如图 9-2 所示。

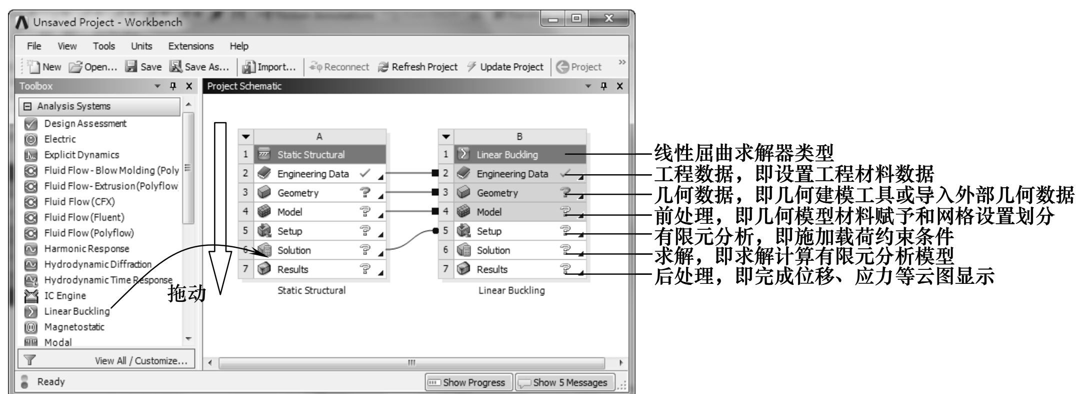


图 9-2 创建屈曲分析项目

9.2　实例 1——风扇罩线性屈曲分析

9.2.1　实例说明

如图 9-3 所示风扇罩，端面固定，顶部作用 10N 的作用力，试分析屈曲性能。

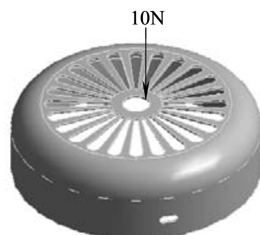


图 9-3　风扇罩

9.2.2　分析思路

在进行屈曲分析时，首先进行静力学分析，并将静力学分析结果作为初始条件传递给屈曲分析，通过屈曲分析得到 Load Multiplier，则真实的临界线性失稳载荷就是该载荷因子乘以载荷所得结果。

9.2.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg, mm.s,° C, mA, N, mV）】命令，设置分析单位，如图 9-4 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 9-5 所示。

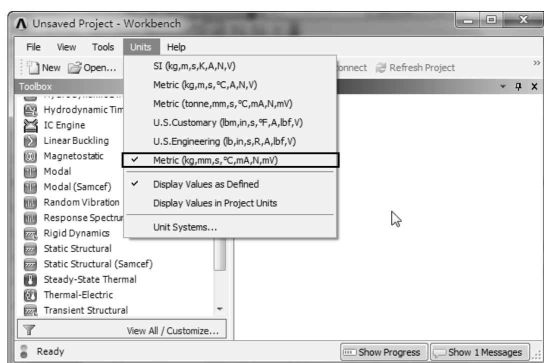


图 9-4　设置分析单位

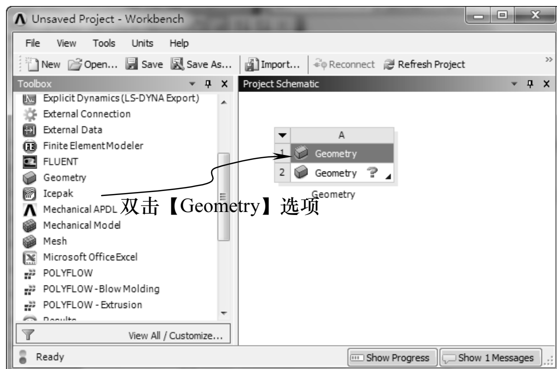


图 9-5　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Rigid Dynamic】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 9-6 所示。

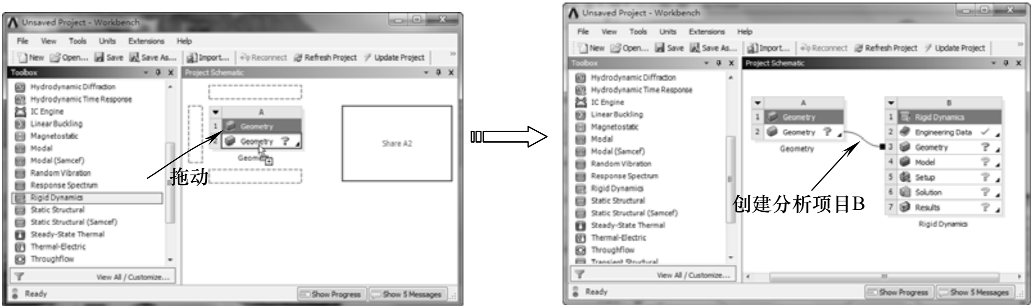


图 9-6　创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Linear Buckling】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 栏的【Solution】项上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 9-7 所示。

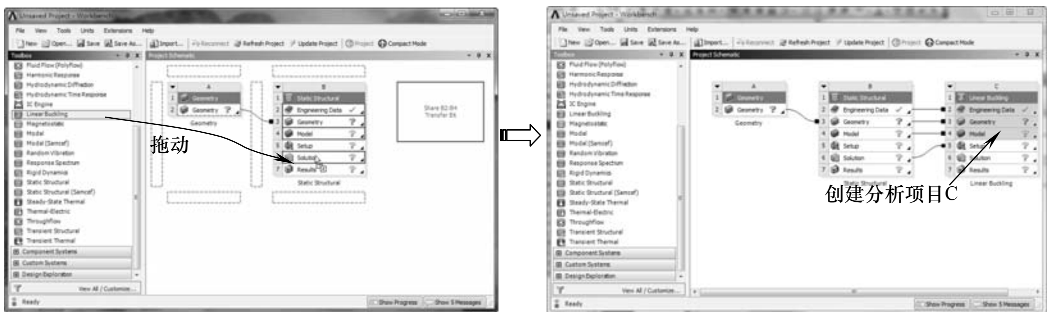


图 9-7　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 9-8 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter09\9.2\uncompleted\风扇罩.sldprt”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 9-9 所示。

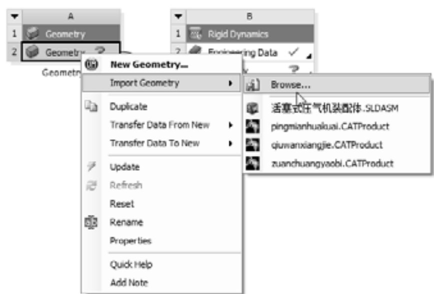


图 9-8　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

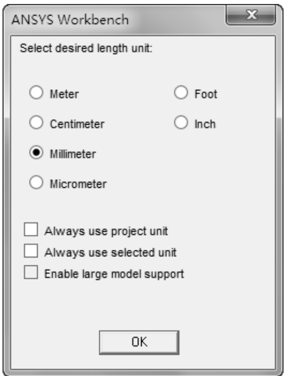


图 9-9　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 ⚡Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 9-10 所示。

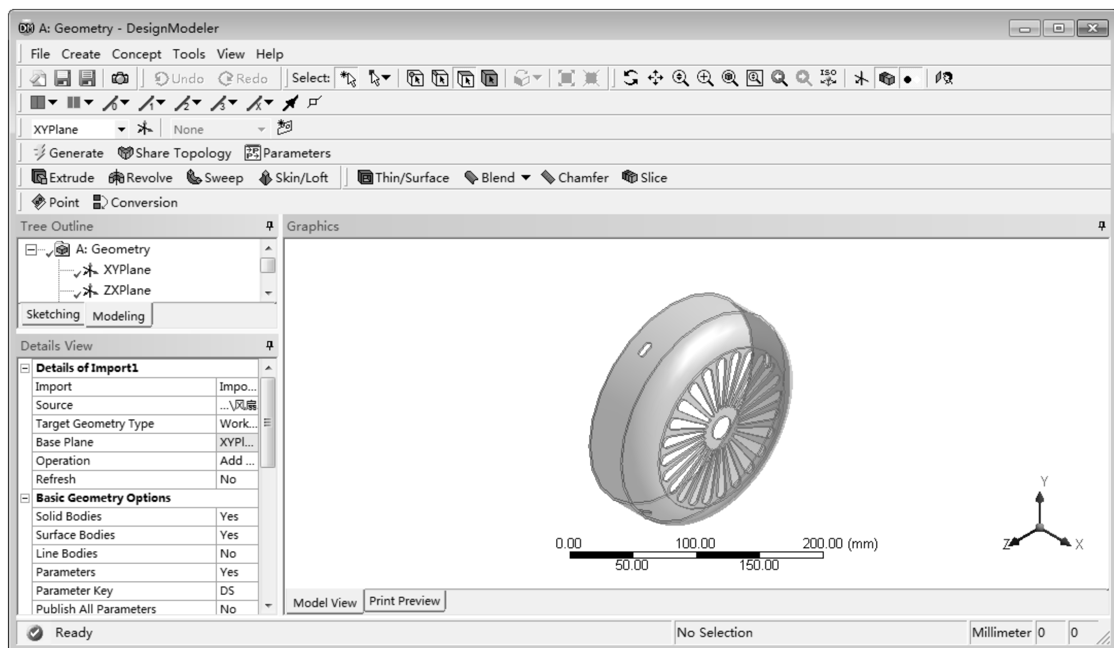


图 9-10　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（fengshanzhao.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 X 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．网格划分

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 9-11 所示。

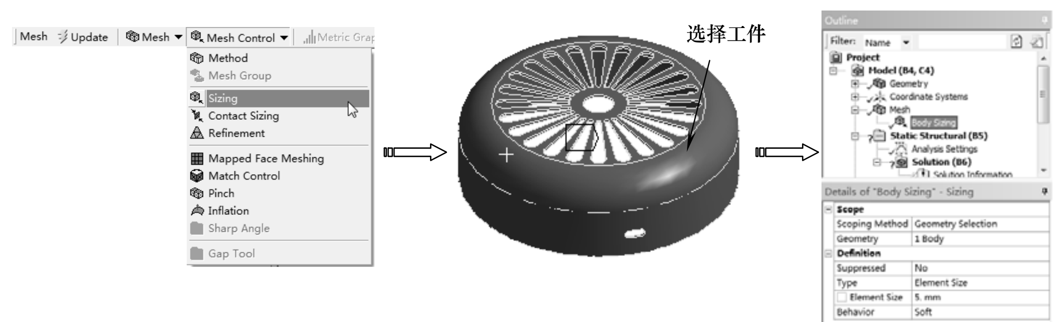


图 9-11　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 9-12 所示。

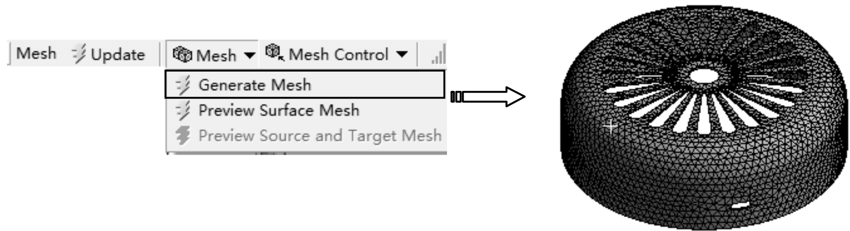


图 9-12　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 9-13 所示。

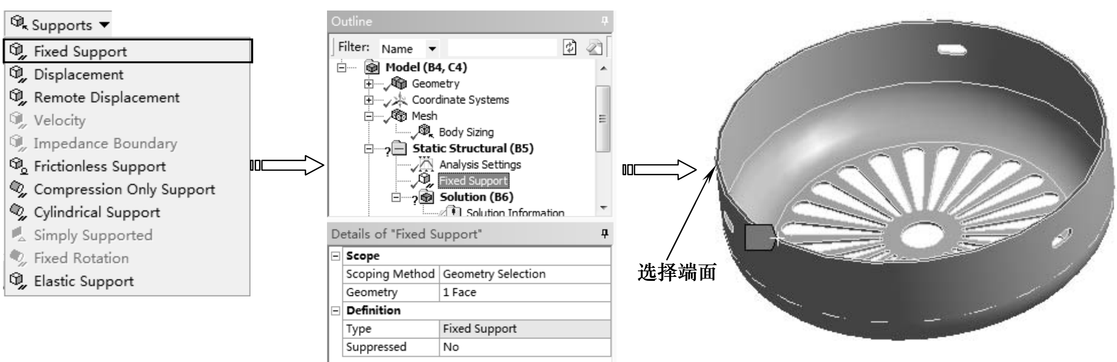


图 9-13　施加位移约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 9-14 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 10，如图 9-14 所示。



图 9-14　施加力

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 9-15 所示。

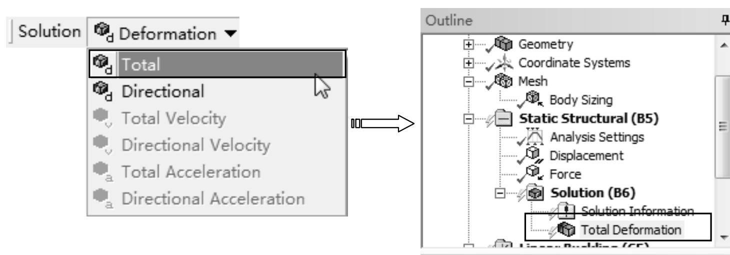


图 9-15　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 9-16 所示。

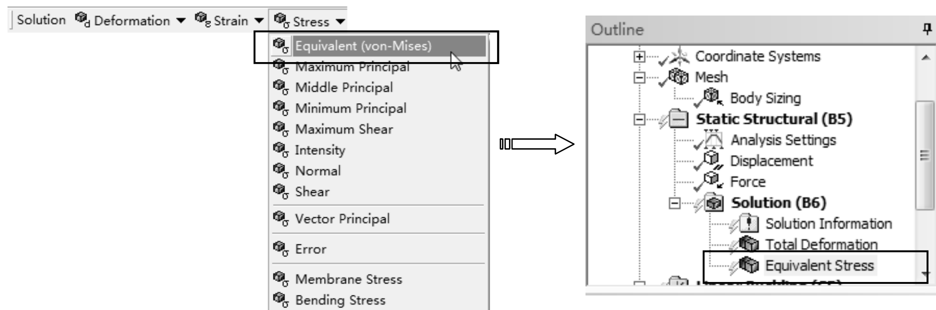


图 9-16　添加应力求解项

8. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 9-17 所示。

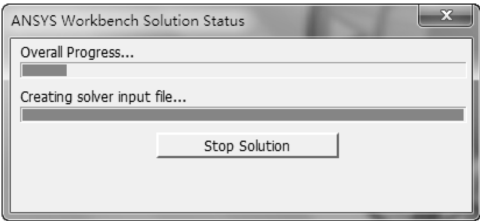


图 9-17 求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0 （True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 9-18 所示。

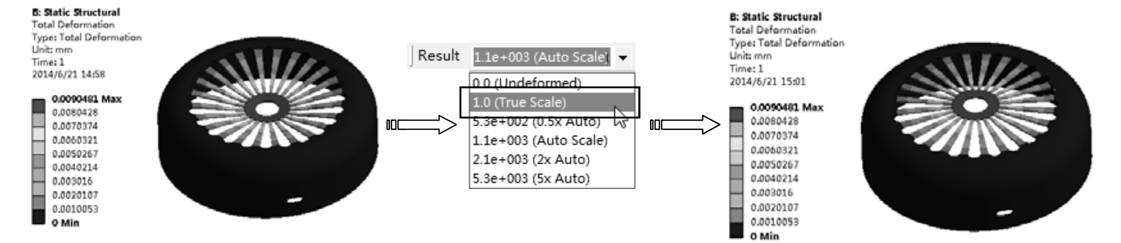


图 9-18 变形云图

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 9-19 所示。

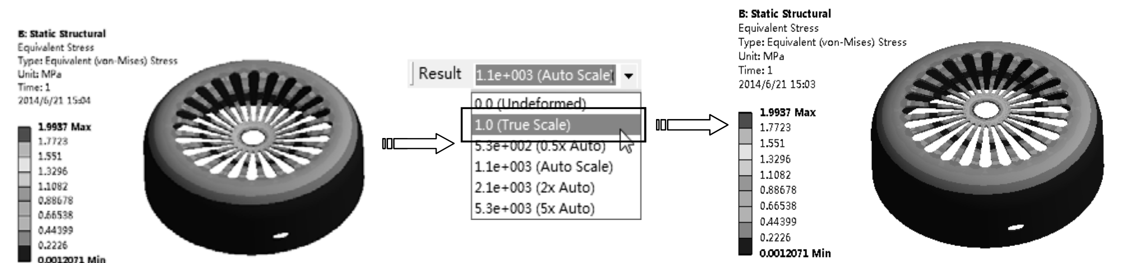


图 9-19 应力云图

9. 设置屈曲分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 9-20 所示。

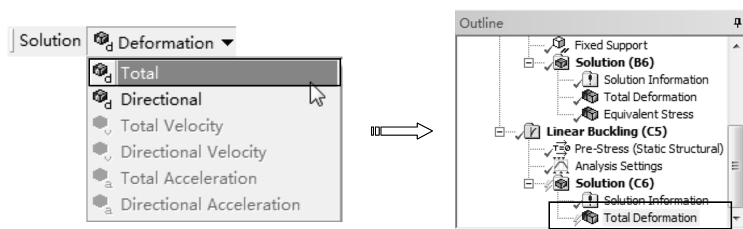


图 9-20　添加变形求解项

10．求解屈曲分析并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 9-21 所示。

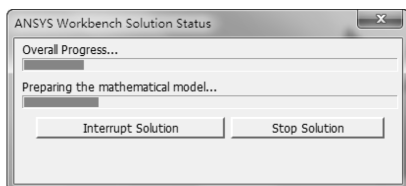


图 9-21　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图，如图 9-22 所示。

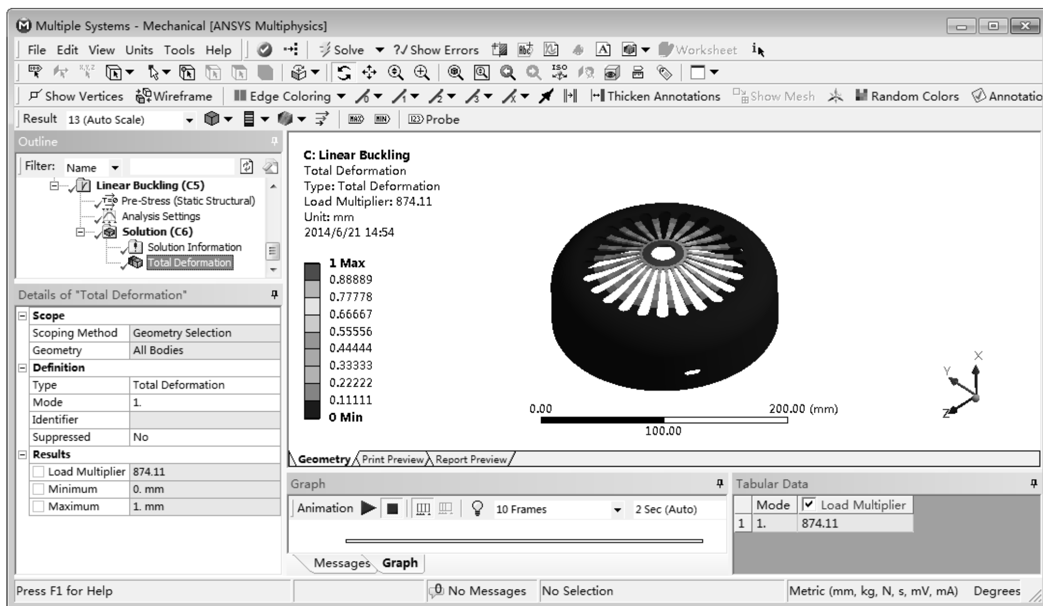


图 9-22　变形云图

从图 9-22 可知【Load Multiplier】为 874.11，由于所施加载荷为真实载荷，说明【Load Multiplier】相当于负载屈曲安全系数，该载荷因子乘以载荷所得结果即为临界线性失稳载荷 8741.1N。

11．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

9.2.4 实例总结

本节以风扇罩为例讲解了 ANSYS Workbench 的屈曲分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：ANSYS Workbench 屈曲分析步骤为：启动 Workbench→建立分析项目→建立几何模型→划分网格→施加载荷和边界条件→求解静力学→求解屈曲分析→结果后处理等。通过屈曲分析得到 Load Multiplier，则真实的临界线性失稳载荷就是该载荷因子乘以载荷所得结果。

9.3 实例 2—— 工字梁非线性屈曲分析

9.3.1 实例说明

如图 9-23 所示工字梁，端面固定，顶部作用 1N 的作用力，试分析非线性临界载荷。



图 9-23 工字梁

9.3.2 分析思路

在进行非线性屈曲分析时，首先进行静力学分析，并将静力学分析结果作为初始条件传递给屈曲分析，通过屈曲分析得到 Load Multiplier，则真实的临界线性失稳载荷就是该载荷因子乘以载荷所得结果，并将该载荷作为施加载荷作用于非线性屈曲分析中，通过绘制力和位移曲线得到工字梁的非线性临界载荷。

9.3.3 具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 9-24 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 9-25 所示。

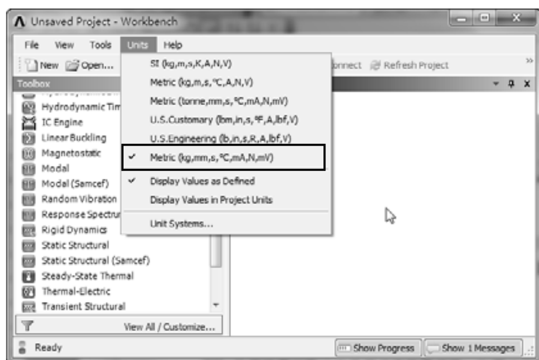


图 9-24　设置分析单位

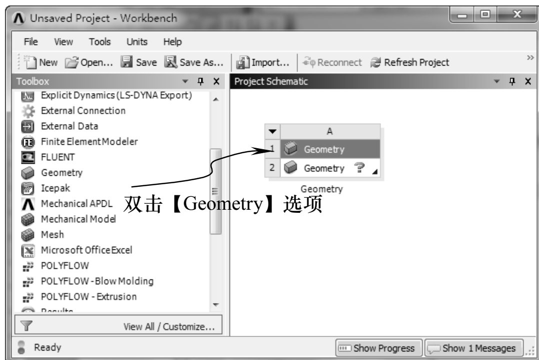


图 9-25　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structural】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 9-26 所示。

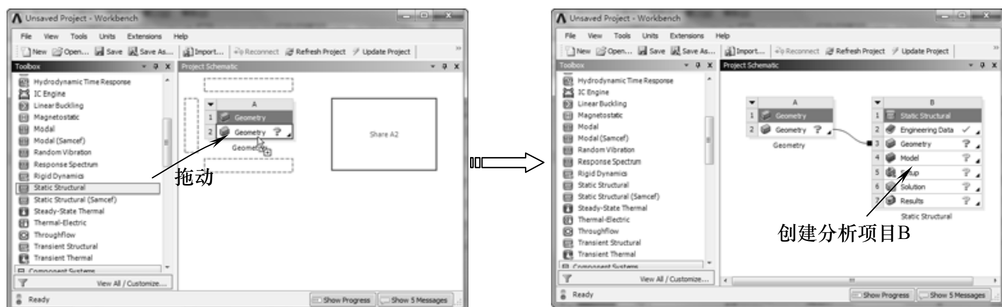


图 9-26　创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Linear Buckling】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 栏的【Solution】项上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 9-27 所示。

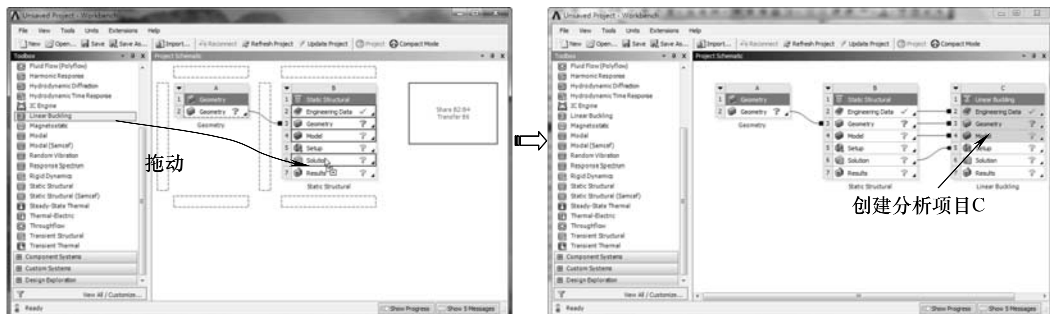


图 9-27　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 9-28 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter09\9.3\uncompleted\gongzi.sldprt”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的？变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 9-29 所示。

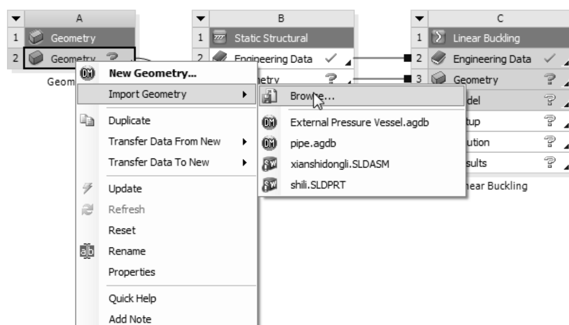


图 9-28　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

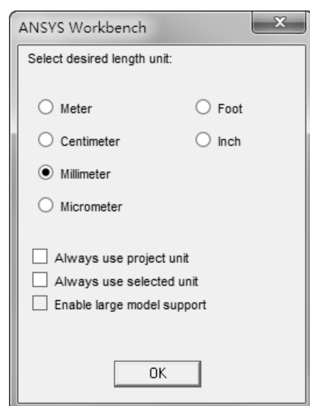


图 9-29　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 9-30 所示。

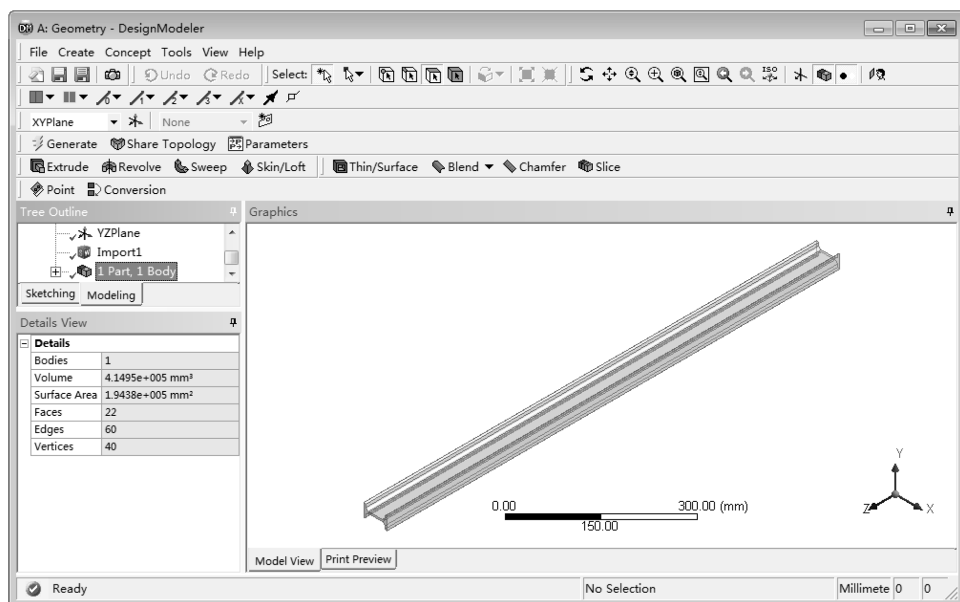


图 9-30　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（30W.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler 界面，返回

到 ANSYS Workbench 主界面。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，在【Details of“Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Element Size】文本框中输入 30mm，如图 9-31 所示。

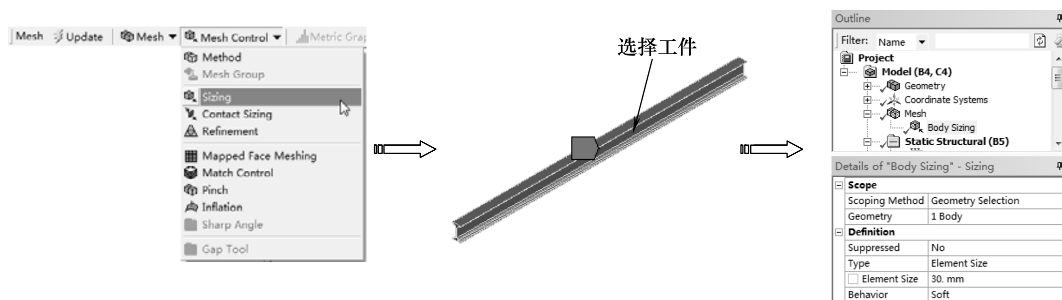


图 9-31　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 9-32 所示。

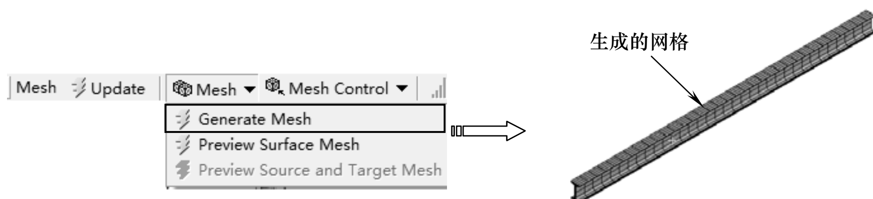


图 9-32　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support（固定）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选

择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择左端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 9-33 所示。

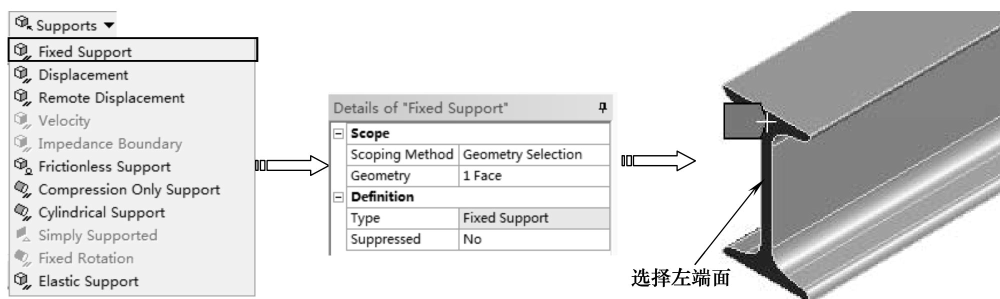


图 9-33　施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Load】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择如图 9-34 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【X Component】文本框中输入 1，如图 9-34 所示。

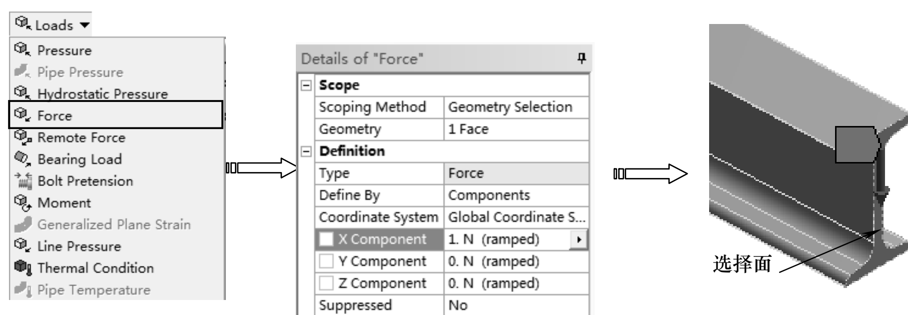


图 9-34　施加力

7. 设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 9-35 所示。

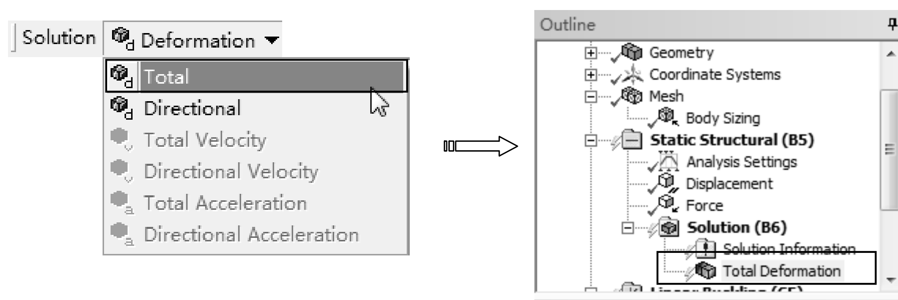


图 9-35　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 9-36 所示。

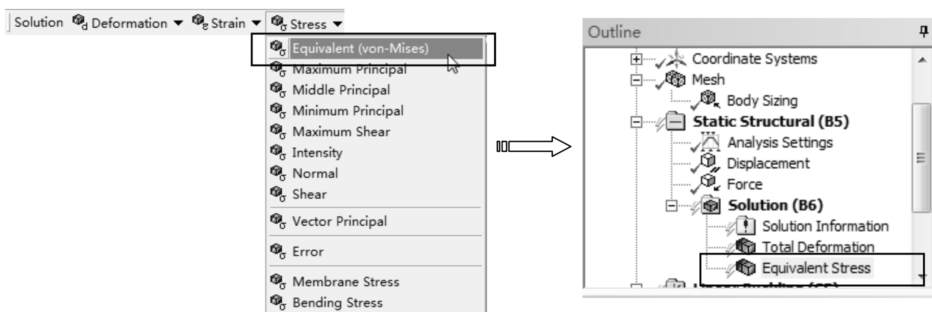


图 9-36　添加应力求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 9-37 所示。

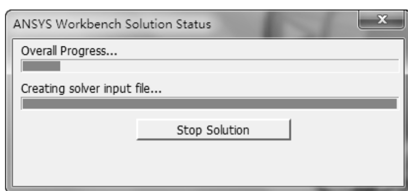
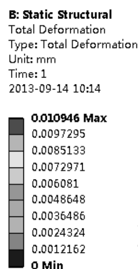


图 9-37　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 9-38 所示。

3）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0（True Scale）】项，可真实显示应力云图，如图 9-39 所示。



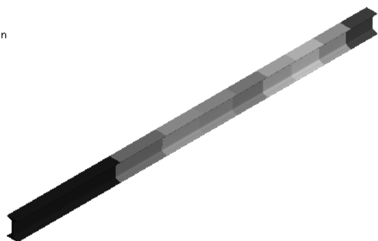
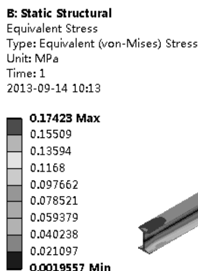


图 9-38　变形云图



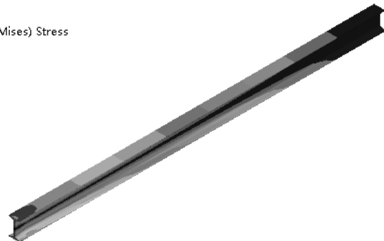


图 9-39　应力云图

9．设置屈曲分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析

树中插入【Total Deformation】项，如图 9-40 所示。

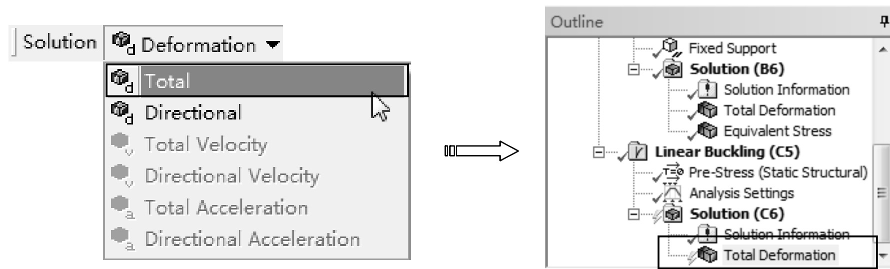


图 9-40　添加变形求解项

10．求解屈曲分析并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 9-41 所示。

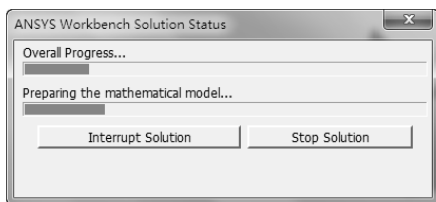


图 9-41　求解进度条

2）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图，如图 9-42 所示。

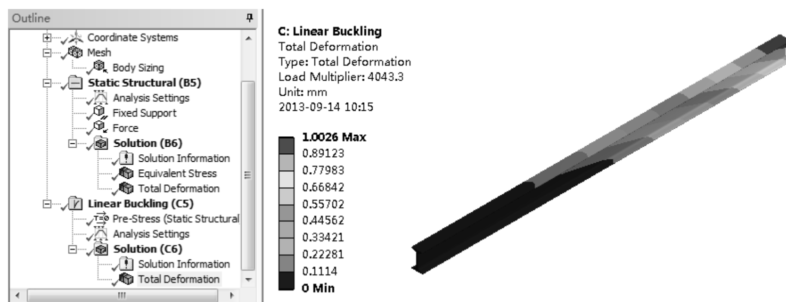


图 9-42　变形云图

从图 9-42 可知【Load Multiplier】为 4043.3，由于所施加载荷为 1N，说明【Load Multiplier】相当于负载屈曲安全系数，该载荷因子乘以载荷所得结果即为临界线性失稳载荷 4043.3N。

11．复制项目 B 得到新项目

1）在项目管理区选中【Static Structural】单元格，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Duplicate】命令，复制一个新项目 D，如图 9-43 所示。

2）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 D 中 D4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在【Analysis Settings】详细设置窗口中设置大变形和自动时间步长，如图 9-44 所示。

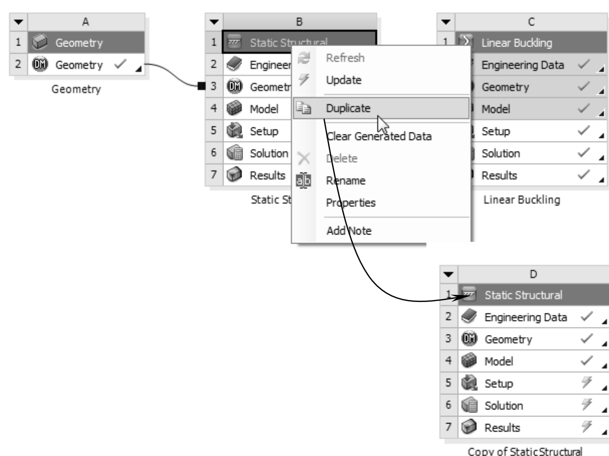


图 9-43　复制新项目

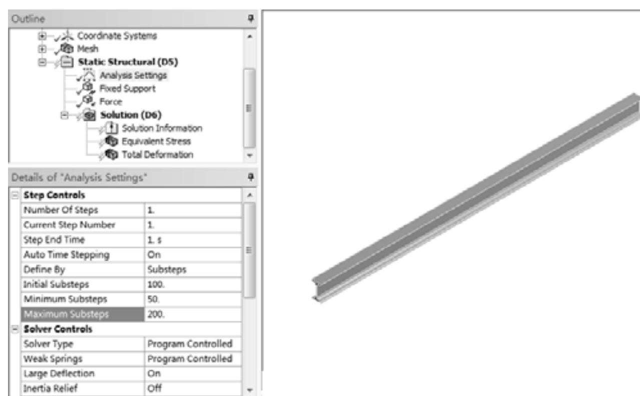


图 9-44　分析设置

3）修改集中力载荷为 10000N，如图 9-45 所示。通常，非线性屈曲分析中外力大于特征值的 20%。

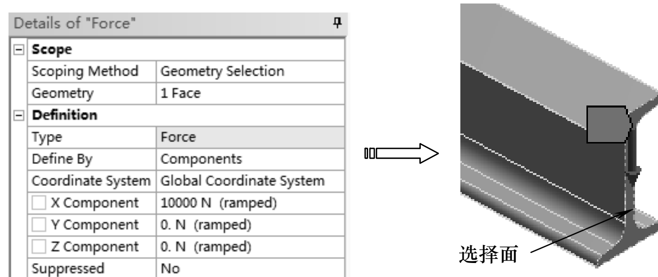


图 9-45　修改力

12．施加初始缺陷

单击工具栏上的【Insert Commands】按钮，弹出【Commands】对话框，输入如图 9-46 所示的命令。UPGEOM 命令用于施加初始缺陷，其将存储在文件夹：E:\ANSYSWORKBENCH\

Chapter10\10.3\ququ_files\dp0\SYS-1\MECH\FILE.RST 中的线性屈曲模态变形乘以因子 0.0001 后来更新悬臂梁的几何形状。

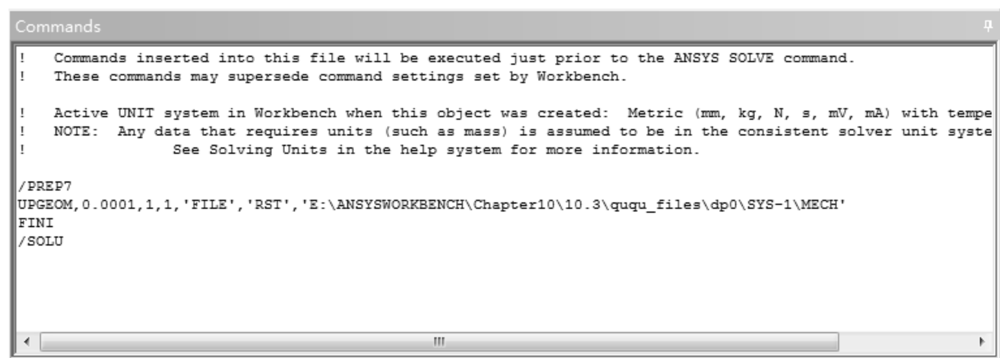


图 9-46 【Commands】对话框

13．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 9-47 所示。

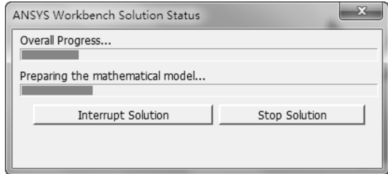


图 9-47　求解进度条

2）在分析树中选中【Force】和【Total Deformation】分支，然后单击工具栏上的【New Chart and Table】按钮，在详细设置窗口中设置参数，如图 9-48 所示。

3）在【Graph】窗口中出现力和变形图，从图中可见当力超过 5000N 左右时，悬臂端的位移急剧增加，故可知悬臂梁的临界载荷为 5000N，如图 9-49 所示。

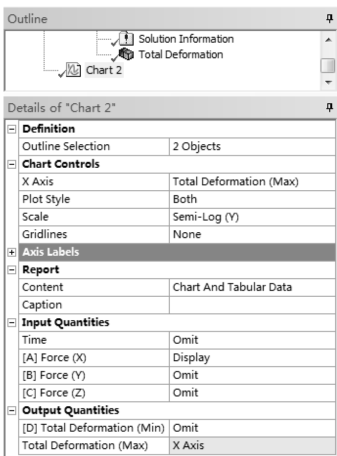


图 9-48　设置图表参数

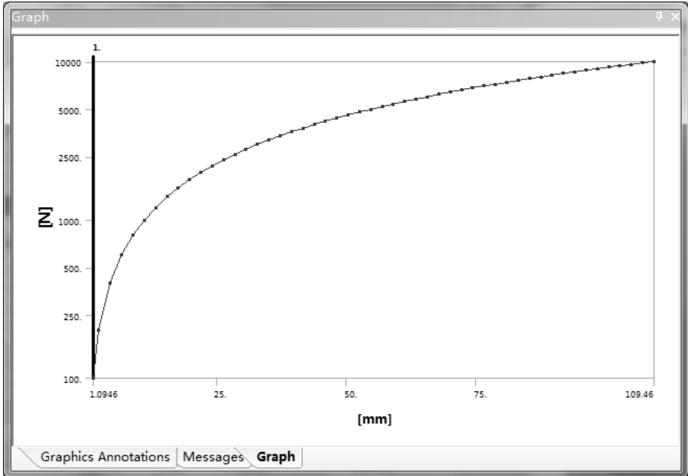


图 9-49　图表显示

14. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

9.3.4 实例总结

本节以工字梁为例讲解了 ANSYS Workbench 的非线性屈曲分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：非线性屈曲分析时，要利用 Insert Commands 工具，并利用 UPGEOM 命令施加初始缺陷，其将线性屈曲模态变形乘以因子 0.0001 后来更新悬臂梁的几何形状，通过绘制力和位移曲线得到工字梁的非线性临界载荷。

9.4 本章小结

本章首先讲解了 ANSYS Workbench 软件屈曲分析的基础知识和分析流程，然后介绍了两个典型案例。读者通过本章学习，将可以掌握 ANSYS Workbench 屈曲分析的操作流程和主要方法。

第 10 章　ANSYS 14.5 Workbench 刚体动力学分析实例

刚体动力学分析是数字化技术全面应用于产品开发过程的方案论证、功能展示、设计定型和结构优化阶段的必要技术环节。本章通过典型案例对刚体动力学的分析步骤和方法进行详细讲解，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、定义连接、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。

10.1　刚体动力学分析概述

从 ANSYS 12.1 开始，ANSYS Workbench 集成了 Rigid Dynamic（刚体动力学）分析模块，利用 Rigid Dynamic（刚体动力学）模块，能够直接对刚体进行运动学和动力学分析，以获得刚体的位移、速度、加速度、作用力等运动学、动力学性能，从而为机械设计提供客观可靠的依据。

10.1.1　刚体动力学分析基础

刚体动力学是力学的一个分支，研究刚体在外力作用下的运动规律，它是机器部件的运动，舰船、飞机、火箭等航行器的运动以及天体姿态运动的力学基础。在研究宇航员的空间运动，车辆的事故中考虑乘员的运动以及运动员的动作分析时，人体也可以认为是躯干与各肢体存在相对运动的系统。

机构运动仿真分析可实现机械工程中非常复杂、精确的机构运动分析，在实际制造前利用零件的三维数字模型进行机构运动仿真已成为现代 CAD 工程中的一个重要方向及课题。机构仿真分析所解决的问题有以下几点：位移、速度、加速度、力，解决零件间干涉、作用力和反作用力等问题。一般来说，工程师首先将零件的三维模型建好，其次确定运动零件，并确定各运动零件之间的约束关系，最后利用特定的分析软件进行机构分析，如 ADAMS、ANSYS 等，其中关键环节为建立零件间的约束关系及载荷定义。

在 ANSYS Workbench 左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Rigid Dynamic】上按住鼠标右键，拖动到项目管理区，即可创建刚体动力学分析项目。按照分析项目从上到下的顺序执行刚体动力学分析，如图 10-1 所示。



图 10-1　创建刚体动力学分析项目

10.1.2　定义连接

Rigid Dynamic 中利用运动副（Joints）、弹簧（Spring）、摩擦接触（Frictionless Contact）等方式来建立零件与零件之间（Body-Body）、零件与机架之间（Body-Ground）的连接，以保证零件间的精确定位。

关节连接（Joint）用来模拟几何体中两点之间的连接关系，每一个点有 6 个自由度，两点间的相对运动由 6 个相对自由度描述，每个运动副的运动方向由关节参考坐标系的方向确定。

1．Fixed（固定）

固定施加到点、线、面上，用于设置体与地面固定（Body-Ground）或者两实体之间刚性连接（Body-Body），约束体所有自由度，如图 10-2 所示。

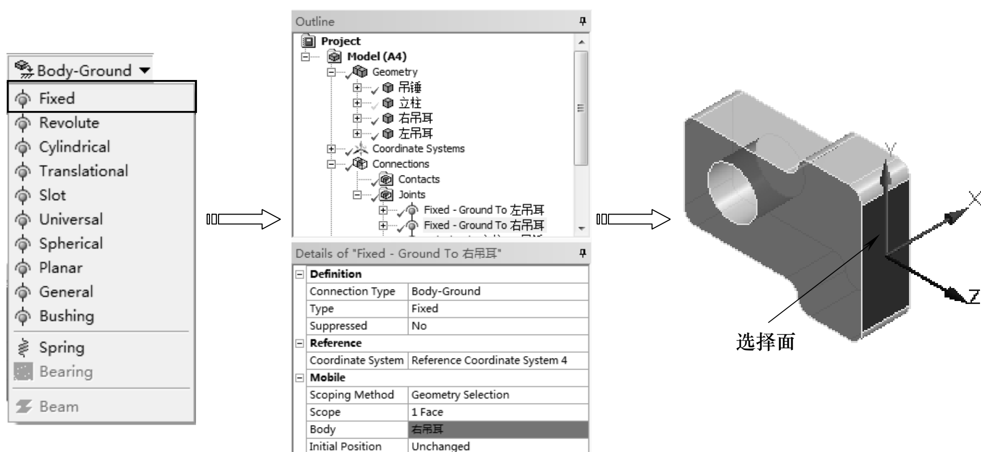


图 10-2　固定

2．Revolute（旋转副）

旋转是指两个构件（Body-Body）或构件和地面（Body-Ground）之间的相对运动为转动

的运动副，也称为铰链。旋转副实现绕 Z 轴转动，限制掉的自由度为 UX、UY、UZ、ROTX、ROTY 等，如图 10-3 所示。

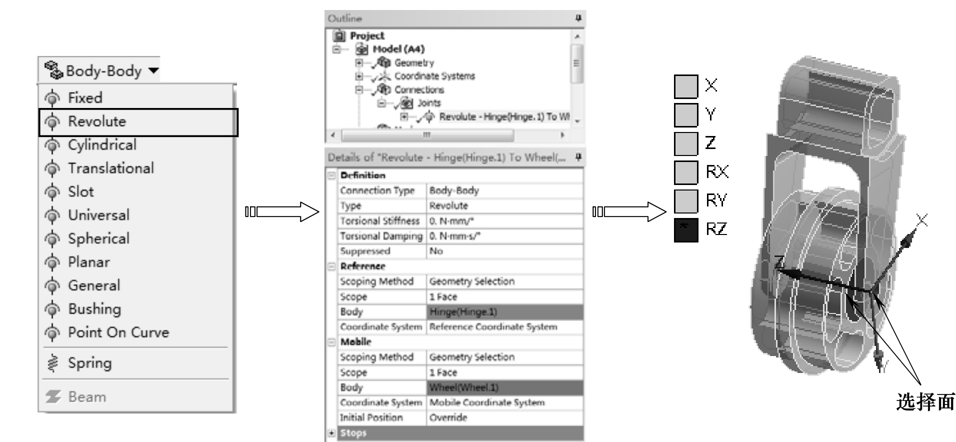


图 10-3　旋转副

✧ Torsional Stiffness（抗扭刚度）：测量轴对扭力的阻力，只能对柱关节和转动关节添加扭转刚度。

✧ Torsional Damping（抗扭阻尼）：测量对轴或沿转轴体产生角振动的抗力，只能对柱关节和转动关节添加抗扭阻尼。

3．Cylindrical（圆柱面滑动副）

圆柱面滑动副是指两个构件之间的沿公共轴线转动又能像移动副一样沿着该轴线滑动的运动副，如钻床摇臂运动。圆柱面滑动副实现绕 Z 轴转动，同时沿 Z 轴方向移动，限制掉的自由度为 UX、UY、ROTX、ROTY 等，如图 10-4 所示。

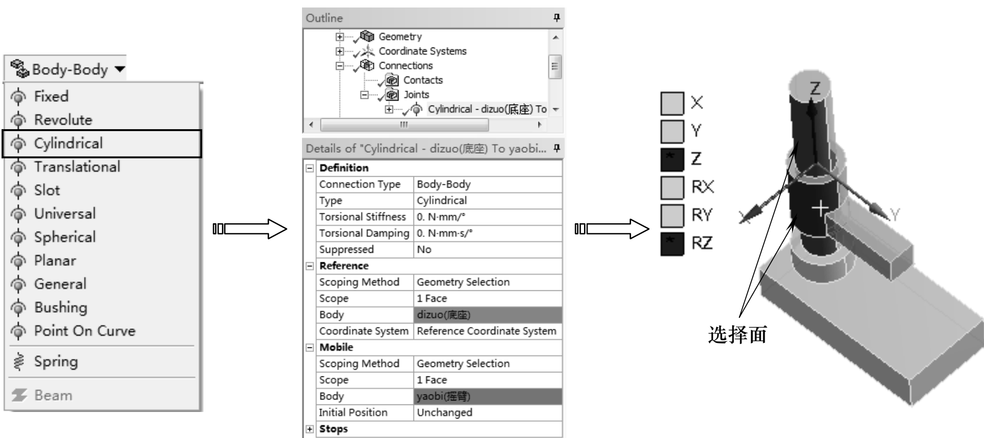


图 10-4　圆柱面滑动副

4．Translational（移动副）

移动副是指两个构件之间的相对运动为沿某一条公共直线滑动运动副，如图 10-5 所示。移动副实现沿 X 轴方向移动，限制掉的自由度为 UY、UZ、ROTX、ROTY、ROTZ 等。

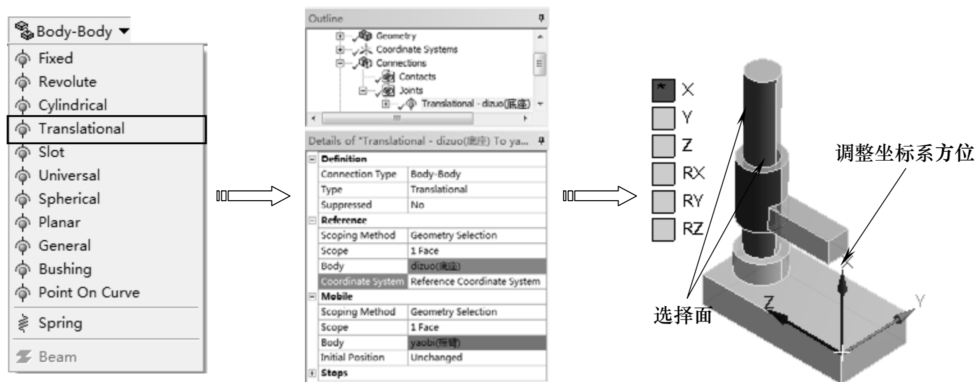


图 10-5　移动副

5．Slot（滑槽）

滑槽是指两个构件之间的相对运动为沿某一条公共直线滑动运动副，如图 10-6 所示。滑槽实现沿 X 轴方向移动，绕 3 个坐标轴转动，限制掉的自由度为 UY、UZ 等。

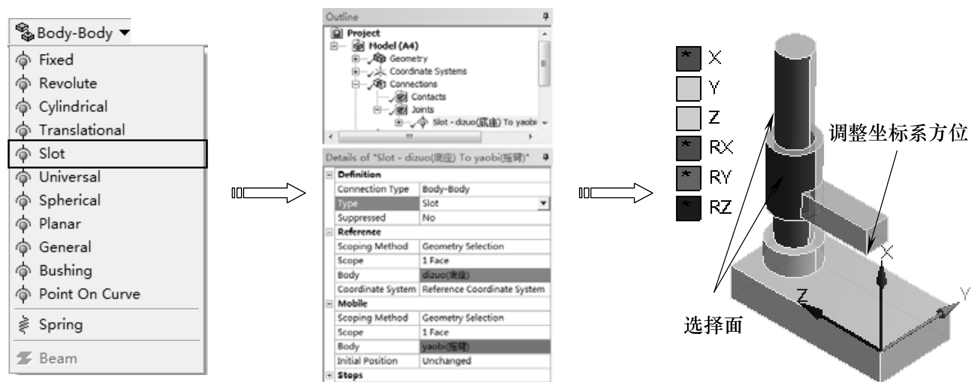


图 10-6　滑槽

6．Spherical（球铰）

球铰是指两个构件之间仅被一个公共点或一个公共球面约束的多自由度运动副，可实现多方向的摆动与转动，如球形万向节。球铰实现沿 X、Y、Z 轴方向转动，限制掉的自由度为 UX、UY、UZ 等，如图 10-7 所示。

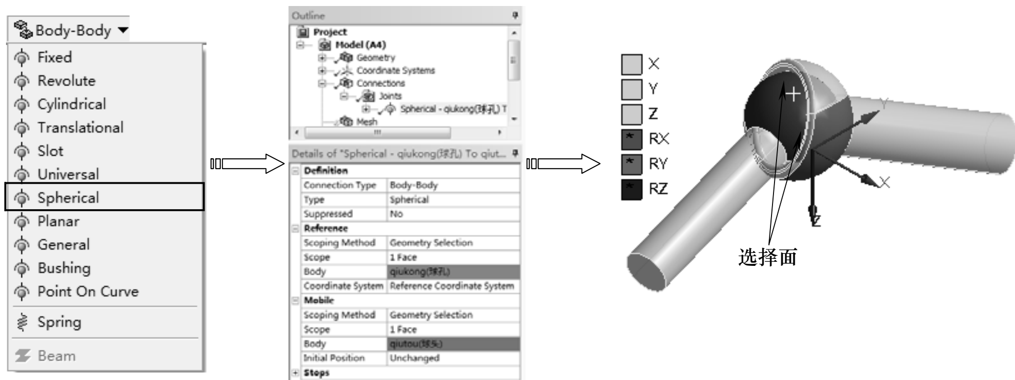


图 10-7　球铰

7. Planar（平面）

平面副是指两个构件之间以公共的平面为约束，具有除沿平面法向移动及绕平面坐标轴转动之外的 3 个自由度，如图 10-8 所示。

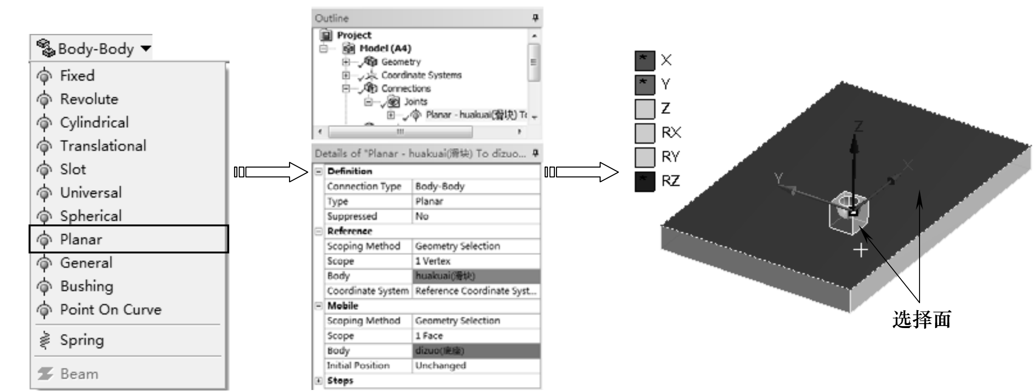


图 10-8　平面副

8. Spring（弹簧）

弹簧作为弹性单元用于储存机械能，当载荷去除后恢复原状，弹簧可为纵簧或扭簧，可具有弹簧刚度和阻尼，允许度弹簧施加力载荷，如图 10-9 所示。

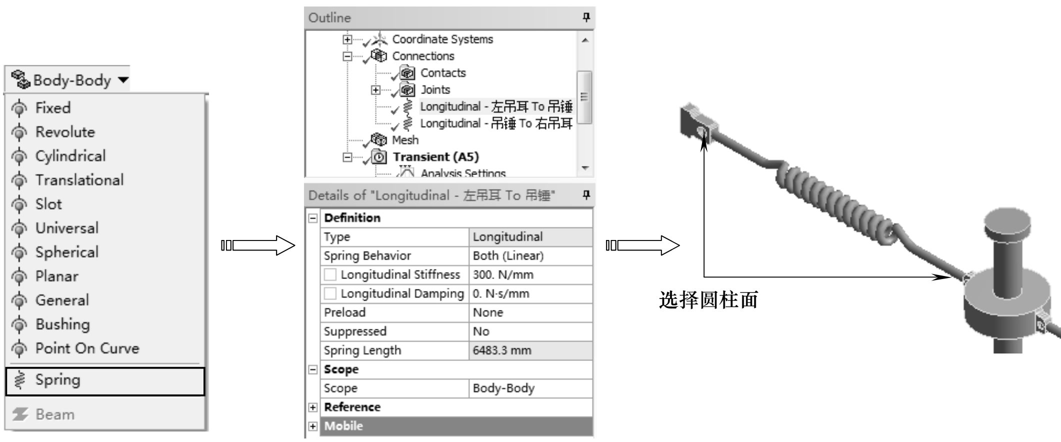


图 10-9　弹簧

- ✧ Spring Behavior: 包括 “Both (Linear)” “Compression Only (压缩)” 和 “Tension Only (拉伸)”。
- ✧ Longitudinal Stiffness: 弹簧刚度。
- ✧ Longitudinal Damping: 弹簧阻尼。
- ✧ Preload: 弹簧预载荷。

10.1.3　载荷和约束

在【Rigid Dynamic】中可使用的载荷有加速度（Acceleration）、标准重力加速度（Standard

Earth Gravity）、运动副载荷（Joint Load）、远端位移（Remote Displacement）、约束方程（Constraint Equation）等。

运动副载荷（Joint Load）也称为关节载荷，它既可以是常量，也可以是随时间变化的。对于变化载荷，可以通过表格输入，也可以通过时间-载荷函数的形式输入，如图 10-10 所示。

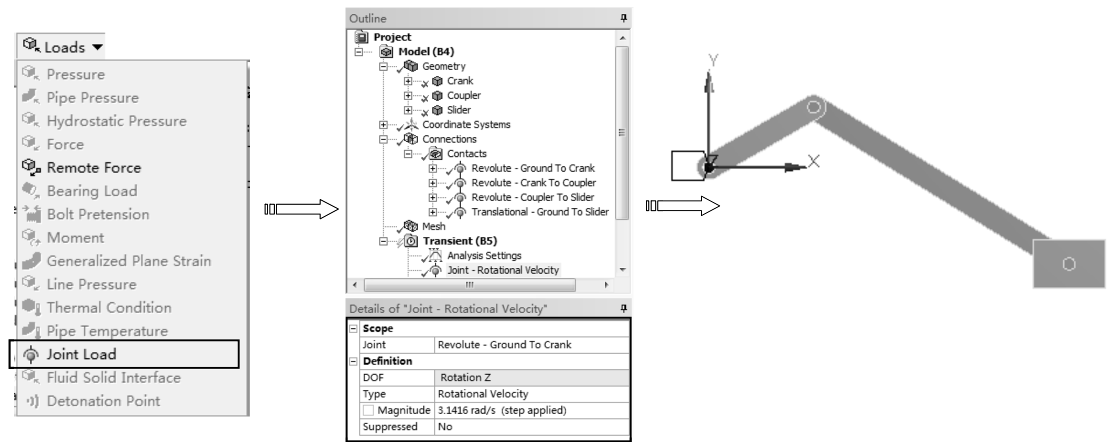


图 10-10　关节载荷

注意：关节转动尽量施加角速度而不是一个渐变的旋转角度值，如 2s 内产生 0°～720°的旋转，应施加的角速度为 2π/s。

10.1.4　分析设置

分析设置中可创建多个时间步，用于定义随时间变化的载荷，如图 10-11 所示。Rigid Dynamic 分析采用的是显式时间积分算法，与隐式时间积分算法相比，不需要进行迭代运算，但为了得到精确解和计算稳定，需要较小的时间步长。时间步长由系统的最高响应频率决定，如果系统的频率响应性能很难确定，使用自动时间步长是一个较好的选择，自动时间步长能够满足大多数情况下的分析精度要求。

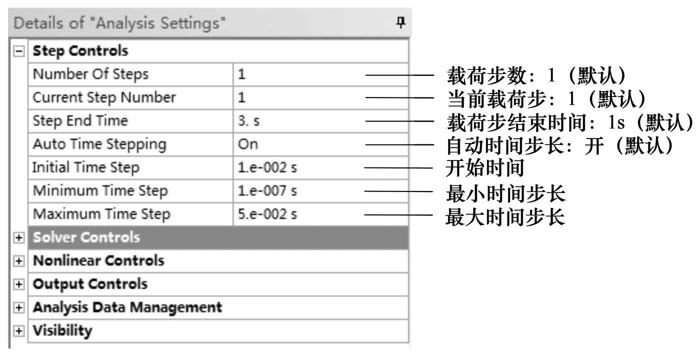


图 10-11　分析设置（Analysis Settings）

10.2　实例 1——连杆机构运动分析

10.2.1　实例说明

如图 10-12 所示三维连杆机构，摇臂以 60rpm 的转速旋转，试分析滑块随时间的位移、速度和加速度。

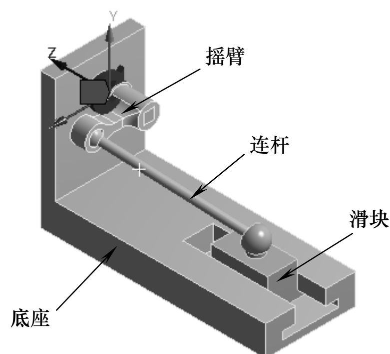


图 10-12　三维连杆机构

10.2.2　分析思路

在进行刚体动力学分析中，设置底座为对底面固定，摇臂与底座为旋转副，摇臂与连杆为球铰，连杆与摇臂为球铰，滑块与底座为移动副。

10.2.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 10-13 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 10-14 所示。

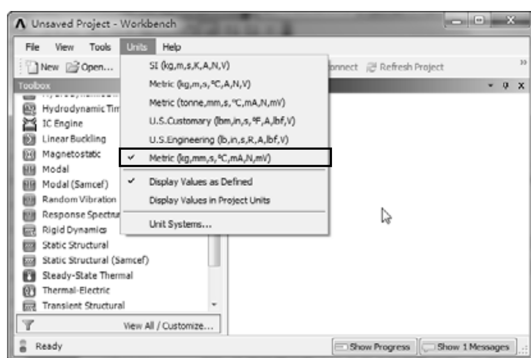


图 10-13　设置分析单位



图 10-14　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Rigid Dynamic】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 10-15 所示。

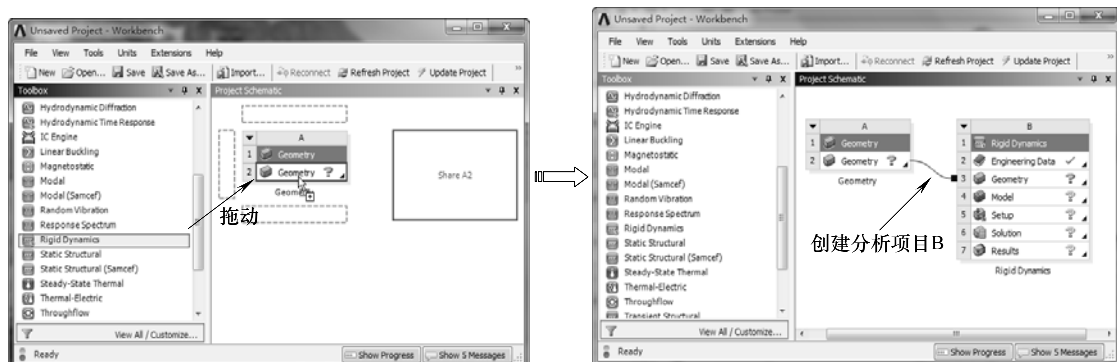


图 10-15　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 10-16 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter10\10.2\uncompleted\3D fourbar linkage.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 10-17 所示。

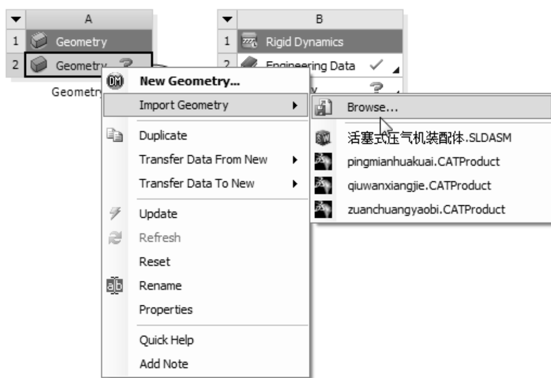


图 10-16　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

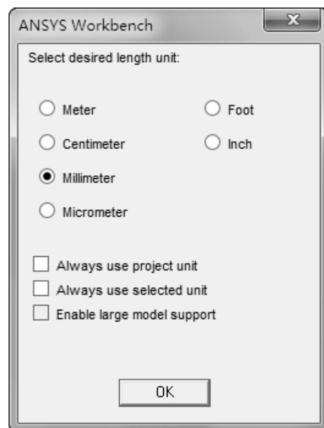


图 10-17　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 10-18 所示。

5）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（yaqiji.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

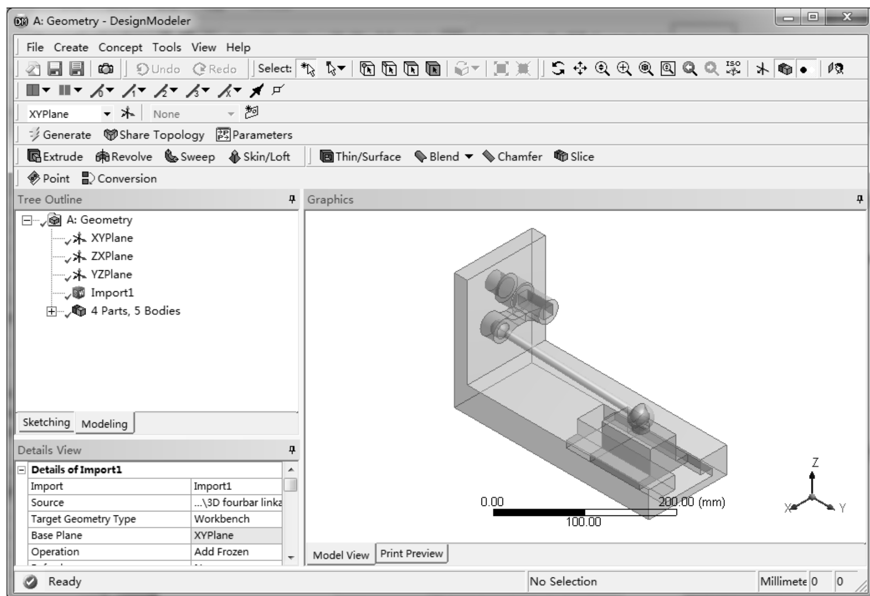


图 10-18　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

3．定义连接

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）展开窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Delete】命令，删除默认的接触设置，如图 10-19 所示。

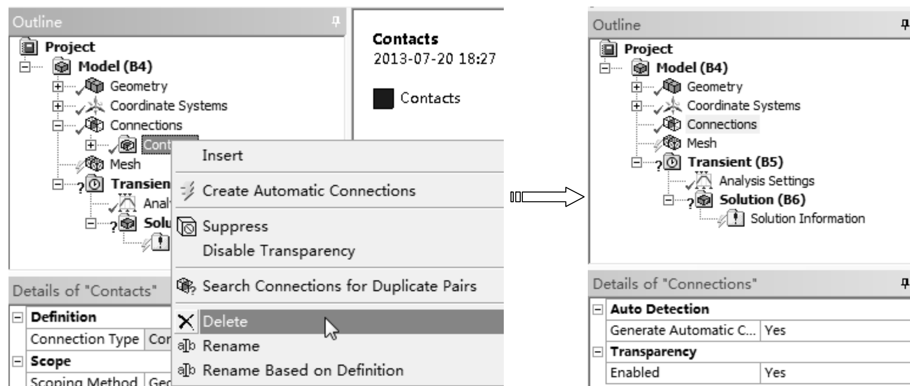


图 10-19　删除默认的接触设置

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】节点，单击【Connections】工具栏上的【Body Ground】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-Ground To No Selection】节点。选择如图 10-20 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-20 所示。

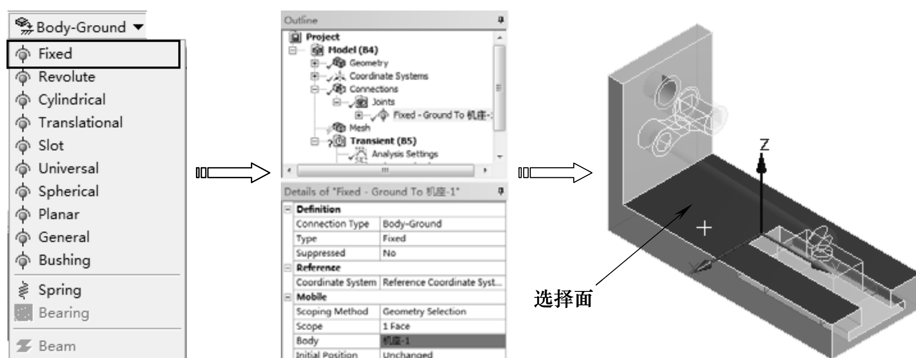


图 10-20　固定

4）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Revolute】命令，分析树中增加【Revolution-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-21 所示的表面，再分别单击详细设置窗口中的【Preference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-21 所示。

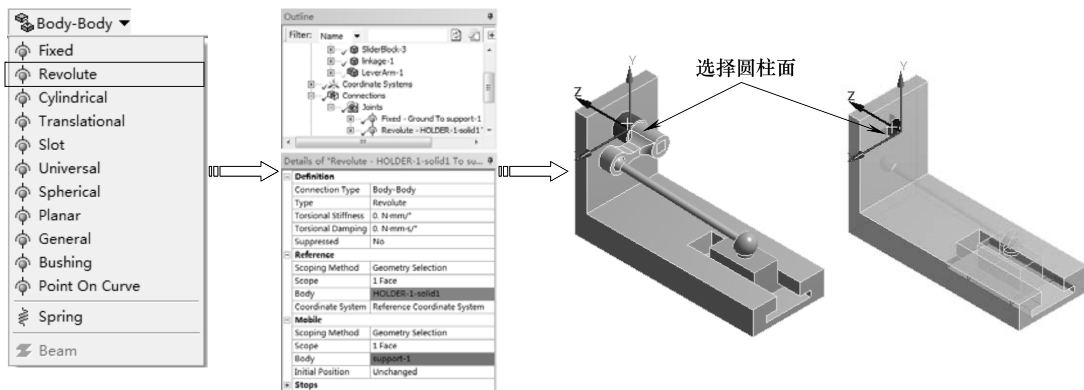


图 10-21　创建旋转副

提示：选择时，可在分析树的【Geometry】节点下的各实体中单击右键，在弹出的快捷菜单中选择【Show Body】或【Hide Body】命令显示隐藏实体。

5）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Spherical】命令，分析树中增加【Spherical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-22 所示的表面，再分别单击详细设置窗口中的【Preference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-22 所示。

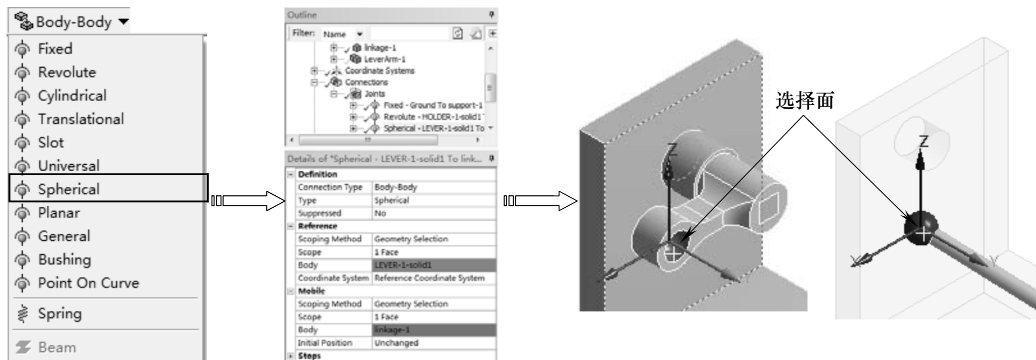


图 10-22　创建球铰 1

6）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Spherical】命令，分析树中增加【Spherical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-23 所示的表面，再分别单击详细设置窗口中的【Preference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-23 所示。

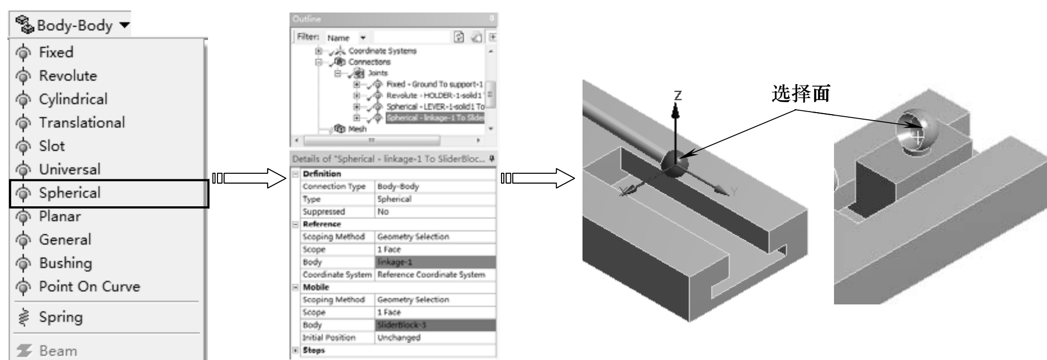


图 10-23　创建球铰 2

7）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Translational】命令，分析树中增加【Translational-No Selection To No Selection】节点。选择如图 10-24 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Preference】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-24 所示。

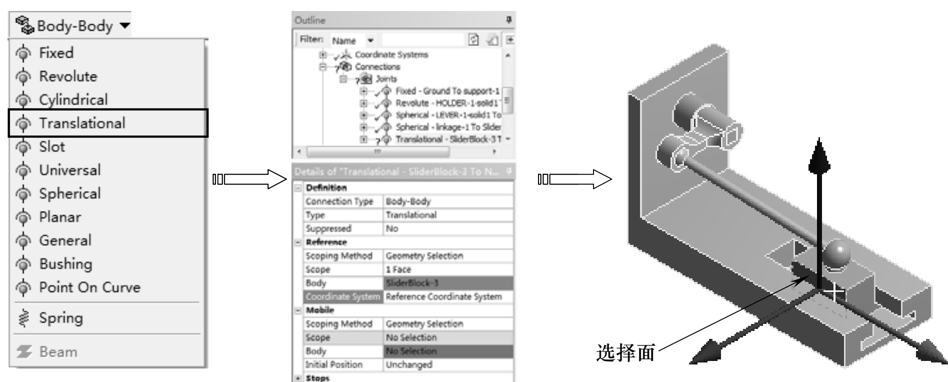


图 10-24　选择参考体

8）单击详细设置窗口中【Reference】下的【Coordinate System】项后的 Reference Coordinate System，在图形区单击红色 X 轴，接着单击 Y 轴，然后单击详细设置窗口中的【Reference】列表中的【Coordinate System】下的【Apply】按钮完成，如图 10-25 所示。

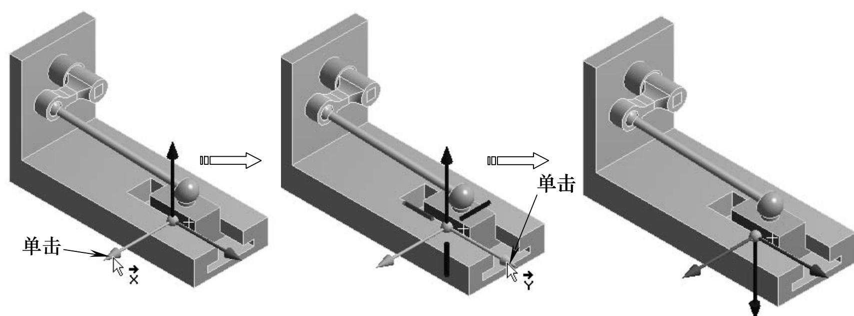


图 10-25　设置参考坐标系

9）单击详细设置窗口中的【Mobile】列表中的【Body】项，选择如图 10-26 所示的表面，单击【Apply】按钮完成，如图 10-26 所示。

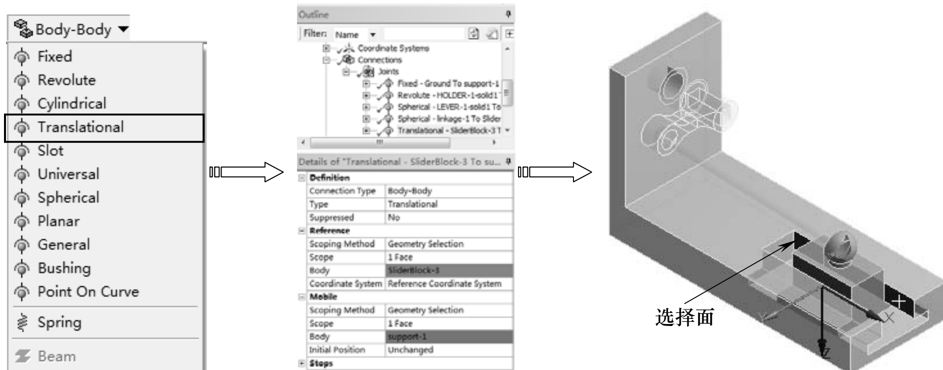


图 10-26　选择活动体

4．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点下的【Analysis Settings】节点，在详细设置窗口中设置【Step End Time】为 2s，如图 10-27 所示。

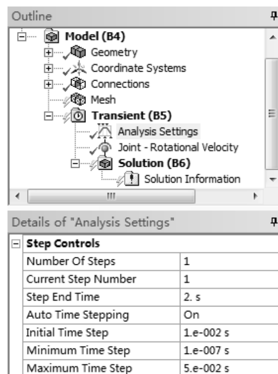


图 10-27　Analysis Settings

2）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Joint Load】命令，在详细设置窗口的【Joint】下拉列表中选择 Revolute 关节，在【Type】下拉列表中选择 Rotational Velocity，设置【Magnitude】为 60rpm，如图 10-28 所示。

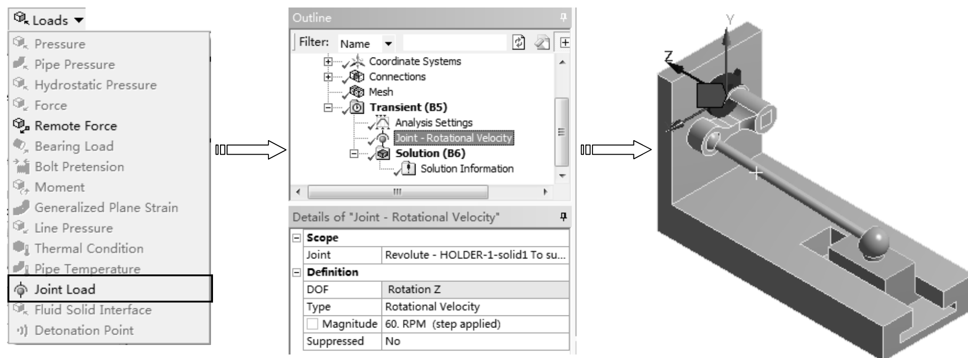


图 10-28　施加旋转角速度

提示：施加旋转角速度时，系统默认的单位为 rad/s，可选择【Units】|【RPM】命令，将单位设置为每分钟转数。

5．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解位移。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional】命令，此时在分析树中插入【Directional Deformation】项，在图形区选择如图 10-29 所示的实体，然后在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 10-29 所示。

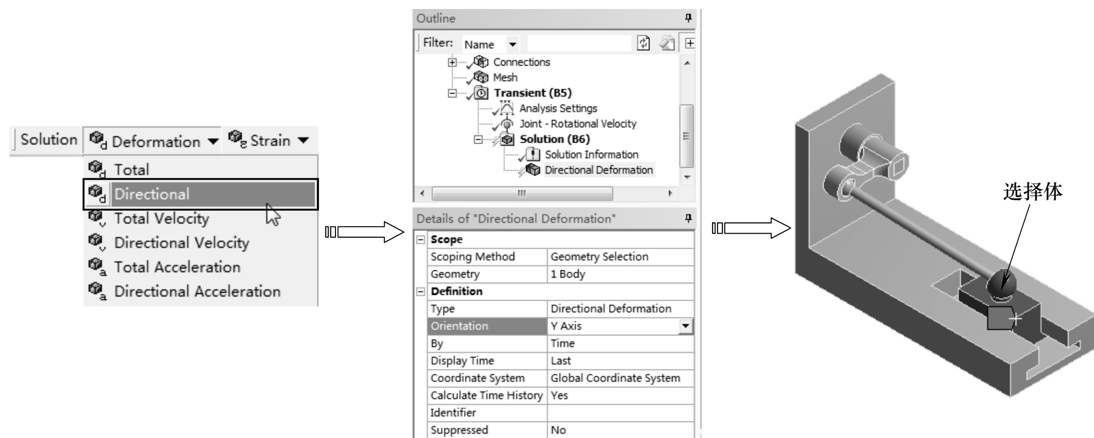


图 10-29　添加位移求解项

3）求解速度。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional Velocity】命令，此时在分析树中插入【Directional Velocity】项，在图形区选择如图 10-30 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 10-30 所示。

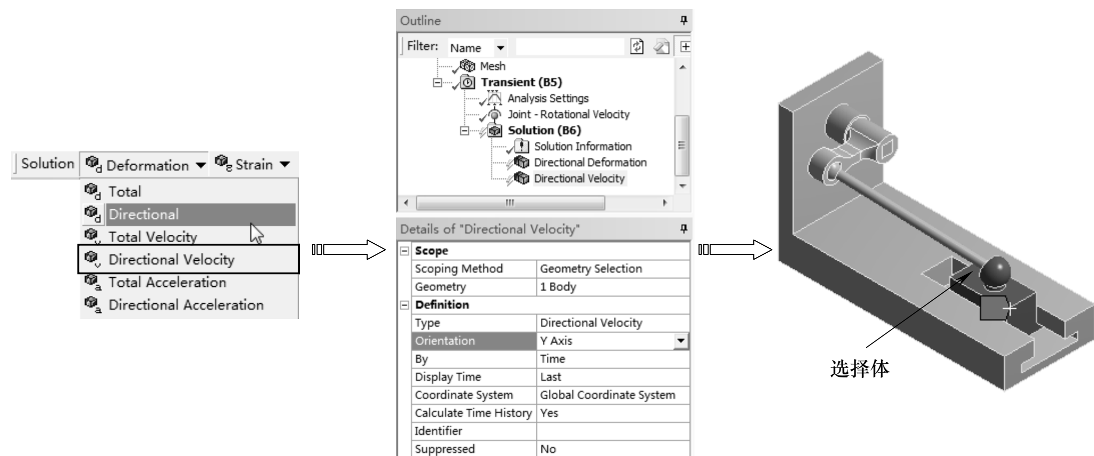


图 10-30　添加速度求解项

4）求解加速度。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional Acceleration】命令，此时在分析树中插入【Directional Acceleration】项，在图形区选择如图 10-31 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 10-31 所示。

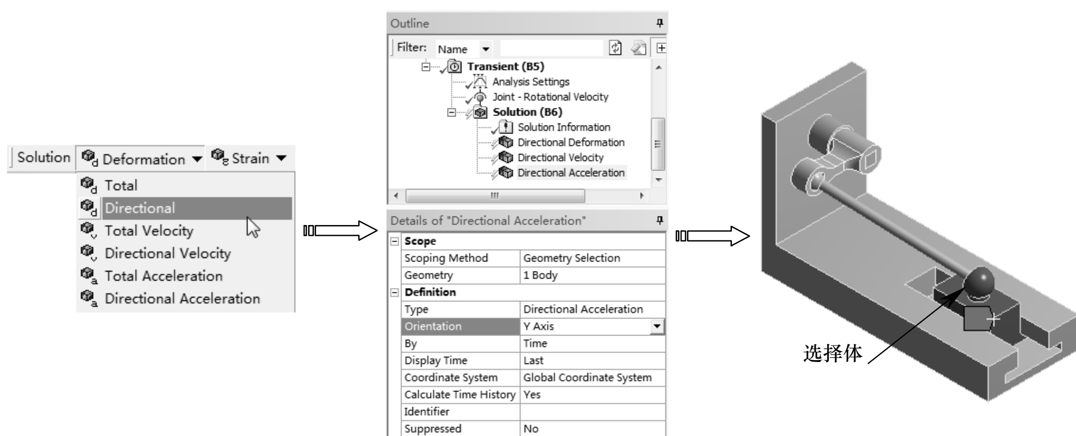


图 10-31　添加加速度求解项

6．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 10-32 所示。

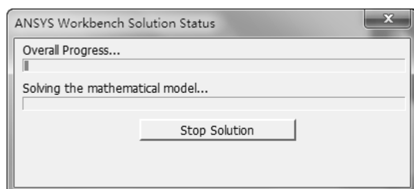


图 10-32　求解进度条

2）位移结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Deformation】项 Directional Deformation，在图形窗口显示位移结果，如图 10-33 所示。

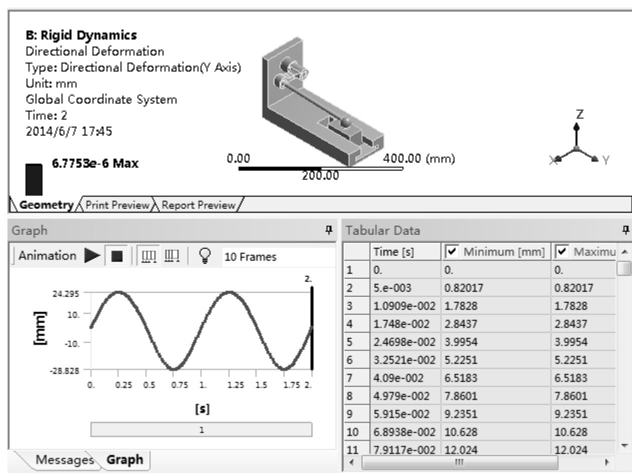


图 10-33　位移结果图和数据表

3）速度结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Velocity】项 Directional Velocity，在图形窗口显示速度结果，如图 10-34 所示。

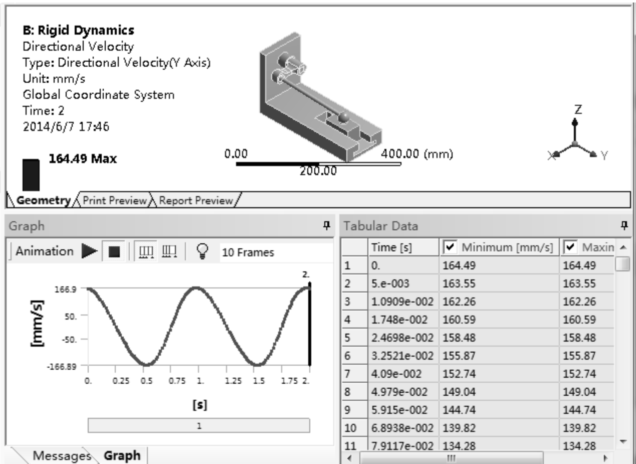


图 10-34　速度结果图和数据表

4）加速度结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Acceleration】项 Directional Acceleration，在图形窗口显示加速度结果，如图 10-35 所示。

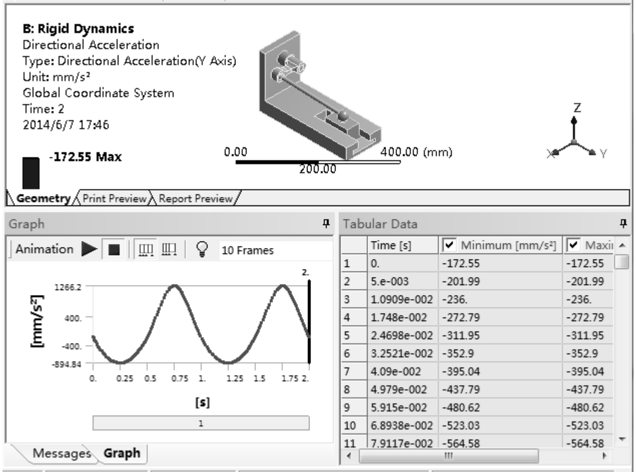


图 10-35　加速度结果图和数据表

7. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

10.2.4　实例总结

本节以三维连杆为例讲解了 ANSYS Workbench 的刚体动力学分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意以下几点：

1）ANSYS Workbench 刚体动力学分析的操作步骤是：启动 Workbench→建立分析项目→

建立几何模型→建立连接→施加载荷和边界条件→设置求解项→求解→结果后处理等。刚体动力学分析中不需要对模型进行网格划分，但需要定义连接。

2）各种连接都有其限制自由度数和方向，它们的方向是相对于局部坐标系来说的，坐标系方向是必不可少的。

10.3　实例 2——压气机动力学分析

10.3.1　实例说明

本例中通过一个简单的活塞式压气机来分析在 2s 内曲轴施加 5N・m 转矩下活塞的位移、速度、加速度，连杆的变形和应力分布，如图 10-36 所示。

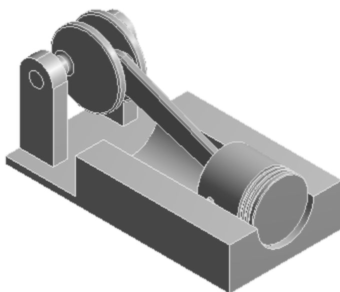


图 10-36　活塞式压气机

10.3.2　分析思路

本例中要先进行刚体动力分析，通过施加扭矩和连接约束来求解活塞上的位移、速度和加速度，然后将关节载荷和惯性力施加到柔体结构上进行柔体分析，即静力学分析。

10.3.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 10-37 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 10-38 所示。

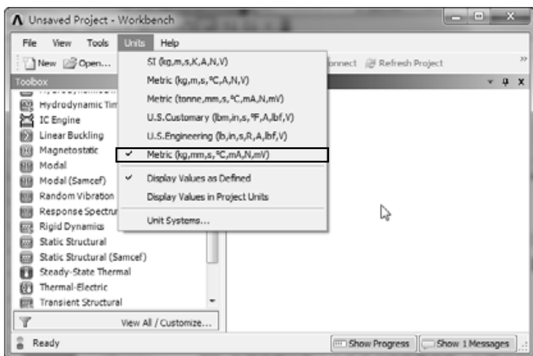


图 10-37　设置分析单位

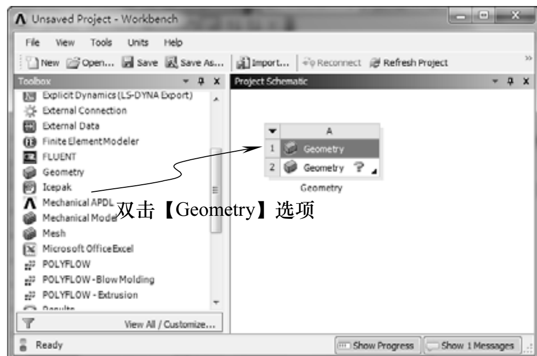


图 10-38　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Rigid Dynamic】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色

高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 10-39 所示。

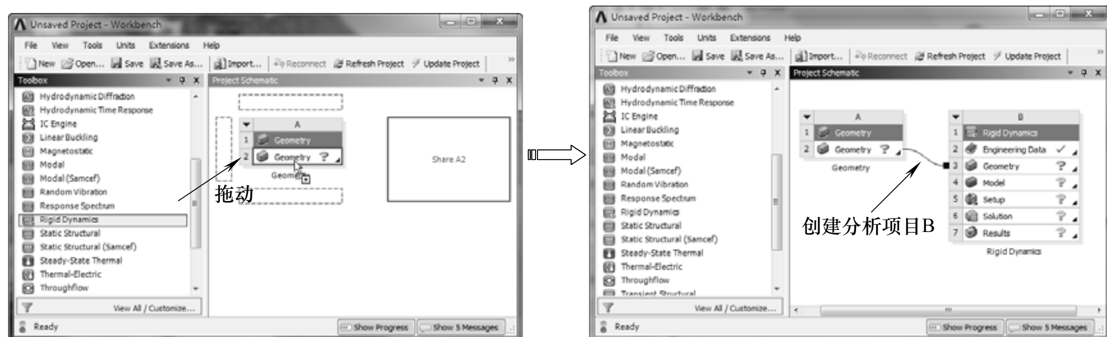


图 10-39 创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 10-40 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter10\10.3\uncompleted\活塞式压气机装配体.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 ? 变为 ✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 10-41 所示。

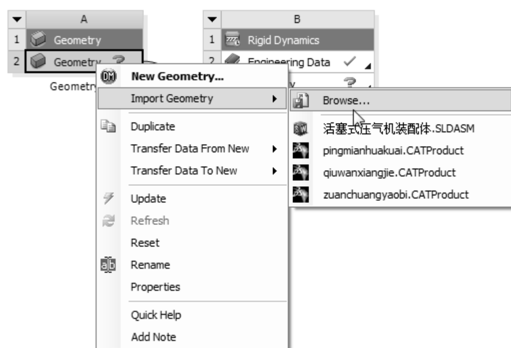


图 10-40 选择【Import Geometry】|【Browse】命令

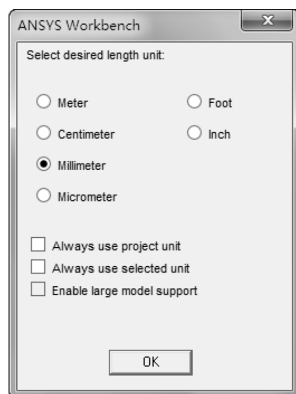


图 10-41 【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示 ⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 10-42 所示。

5）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（yaqiji.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

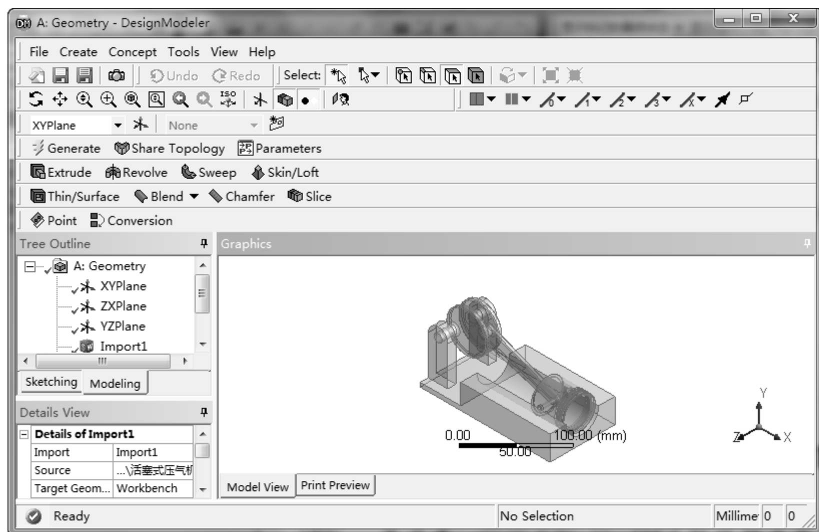


图 10-42　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

3．定义连接

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入【Mechanical】界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）展开窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Deleted】命令，删除默认的接触设置，如图 10-43 所示。

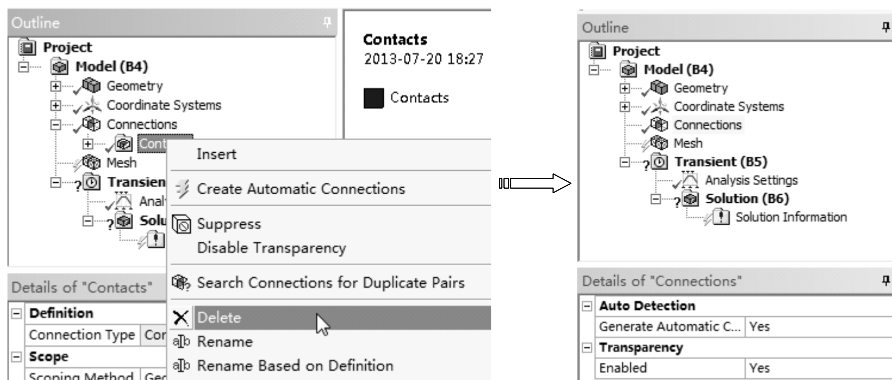


图 10-43　删除默认接触设置

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】节点，单击【Connections】工具栏上的【Body-Ground】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-Ground To No Selection】节点。选择如图 10-44 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-44 所示。

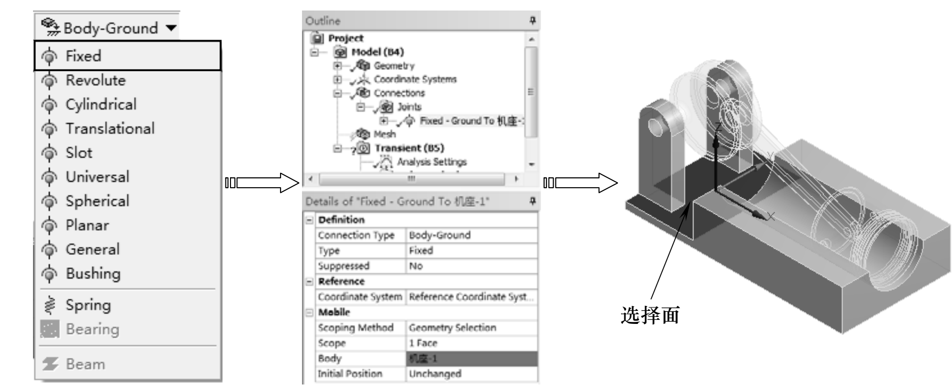


图 10-44　固定

4）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-45 所示的表面，然后单击详细设置窗口中的【Preference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

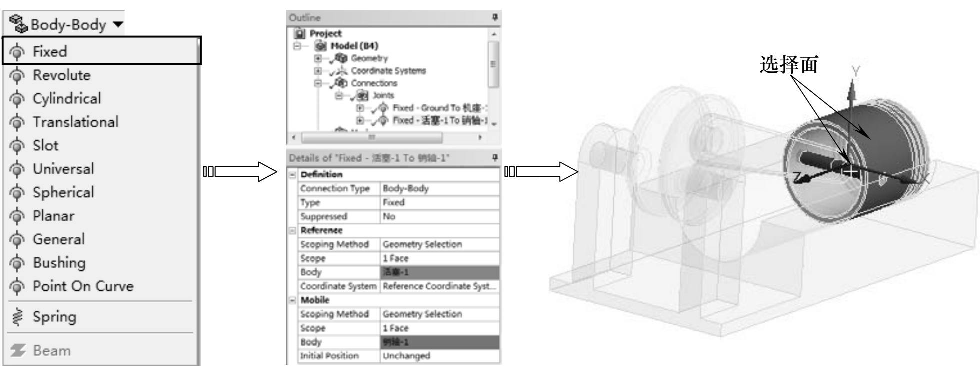


图 10-45　刚体固定

5）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Revolute】命令，分析树中增加【Revolution -No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-46 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-46 所示。

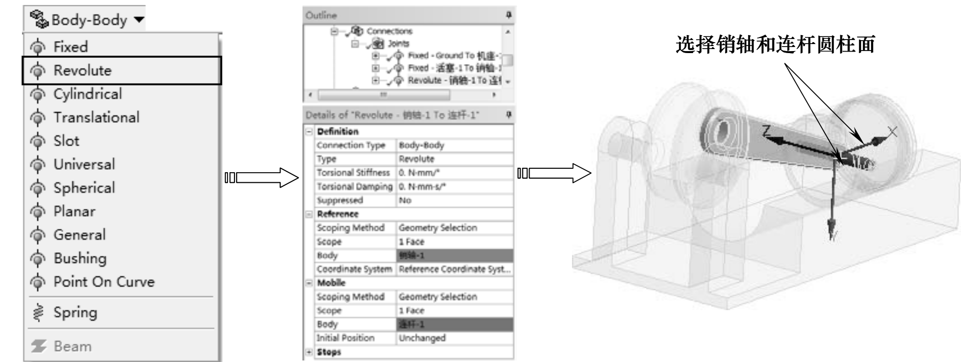


图 10-46　创建旋转副

6）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Revolute】命令，分析树中增加

【Revolution-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-47 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-47 所示。

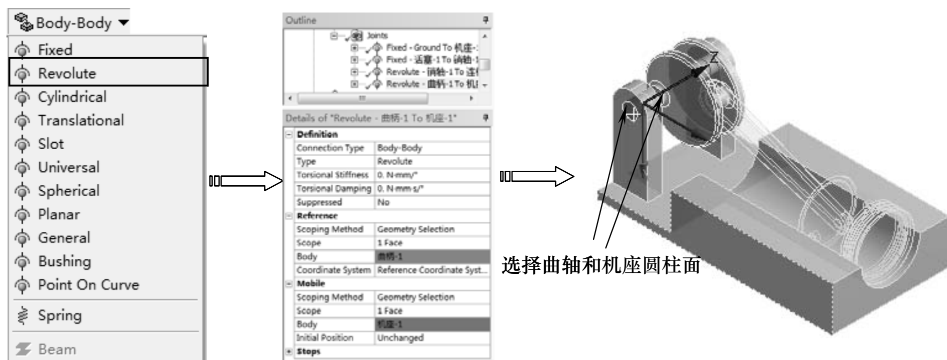


图 10-47　创建旋转副

7）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Cylindrical】命令，分析树中增加【Cylindrical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-48 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-48 所示。

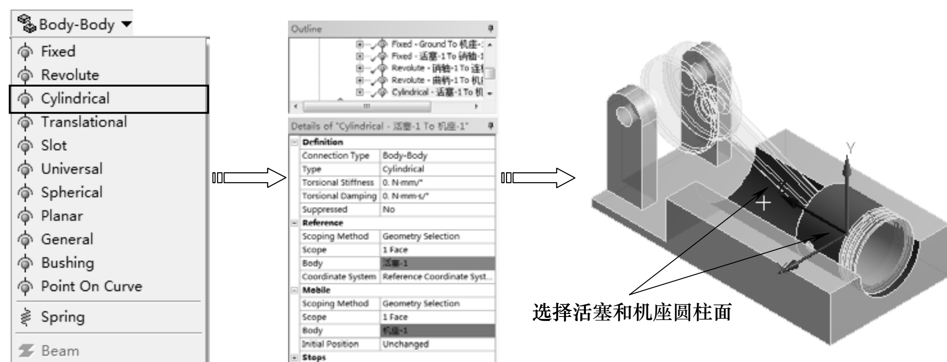


图 10-48　创建柱面运动副

8）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Cylindrical】命令，分析树中增加【Cylindrical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-49 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-49 所示。

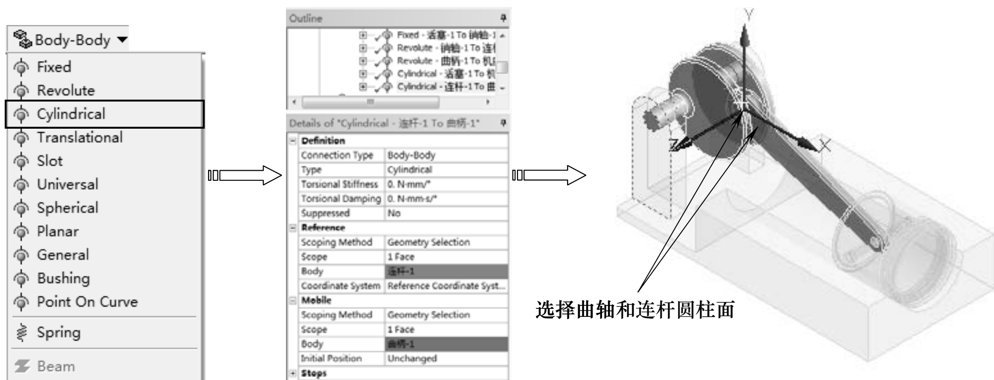


图 10-49　创建柱面运动副

注意：选择时，可在分析树的【Geometry】节点下的各实体中单击右键，在弹出的快捷菜单中选择【Show Body】或【Hide Body】命令显示隐藏实体。

4．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点下的【Analysis Settings】节点，在详细设置窗口中设置【Step End Time】为 2s，如图 10-50 所示。

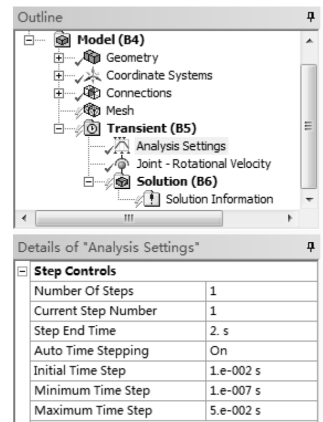


图 10-50　Analysis Settings

2）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Joint Load】命令，在详细设置窗口的【Joint】下拉列表中选择 Revolute-曲轴-1 To 机座-1，在【Type】下拉列表中选择 Moment，在【Tabular Data】窗口中输入 0 和 5，如图 10-51 所示。

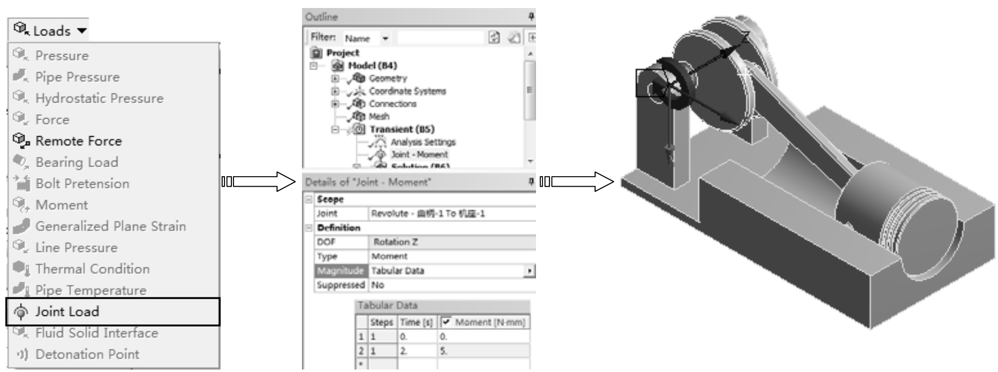


图 10-51　施加扭矩

5．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解位移。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional】命令，此时在分析树中插入【Directional Deformation】项，在图形区选择如图 10-52 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 X Axis，如图 10-52 所示。

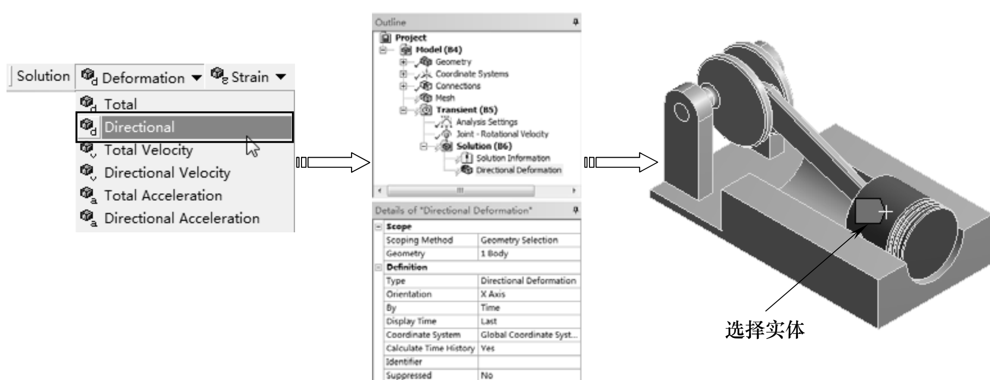


图 10-52　添加位移求解项

3）求解速度。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional Velocity】命令，此时在分析树中插入【Directional Velocity】项，在图形区选择如图 10-53 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 X Axis，如图 10-53 所示。

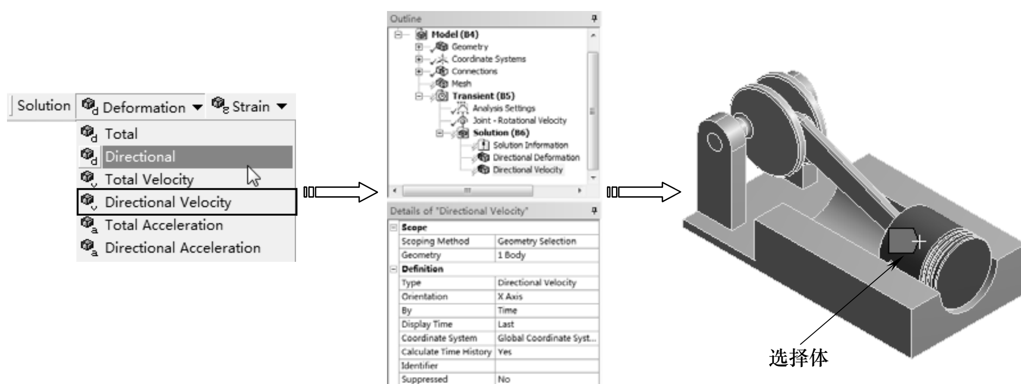


图 10-53　添加速度求解项

4）求解加速度。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Directional Acceleration】命令，此时在分析树中插入【Directional Acceleration】项，在图形区选择如图 10-54 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 X Axis，如图 10-54 所示。

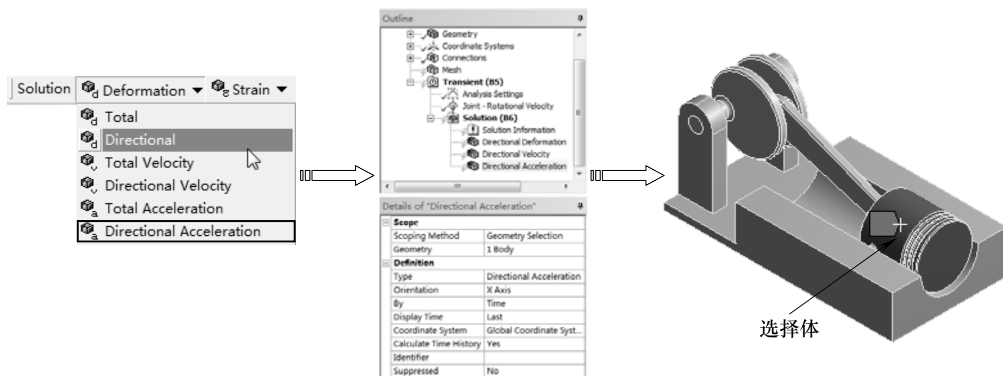


图 10-54　添加加速度求解项

6．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 10-55 所示。

2）位移结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Deformation】项 Directional Deformation，在图形窗口显示位移结果，如图 10-56 所示。

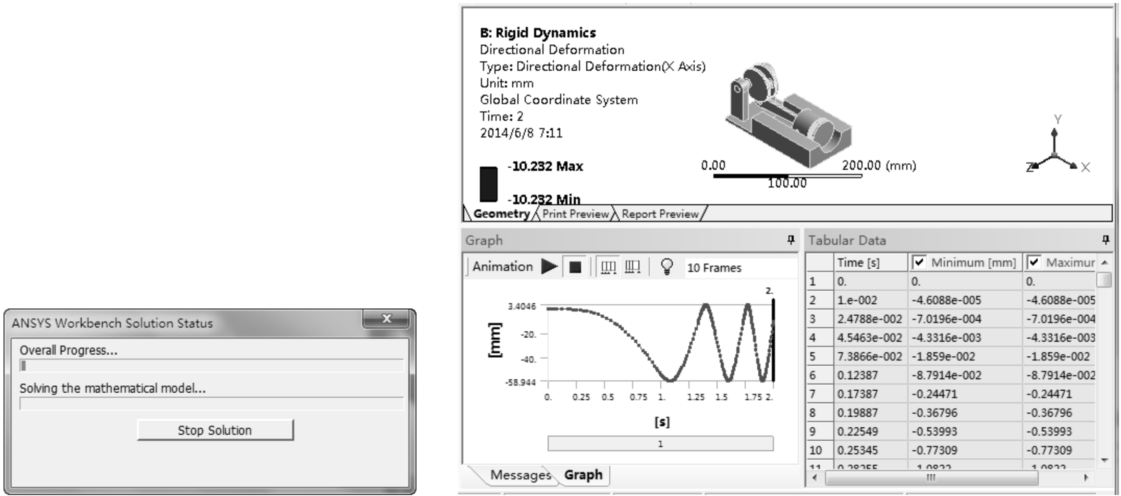


图 10-55　求解进度条　　　　图 10-56　位移结果图和数据表

3）速度结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Velocity】项 Directional Velocity，在图形窗口显示速度结果，如图 10-57 所示。

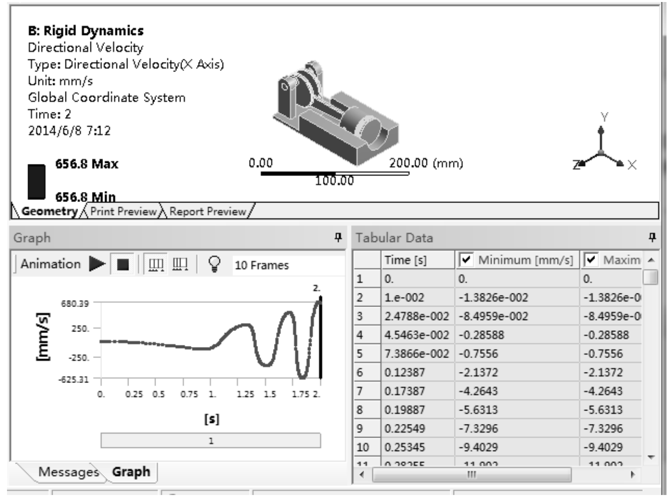


图 10-57　速度结果图和数据表

4）加速度结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Acceleration】项 Directional Acceleration，在图形窗口显示加速度结果，如图 10-58 所示。

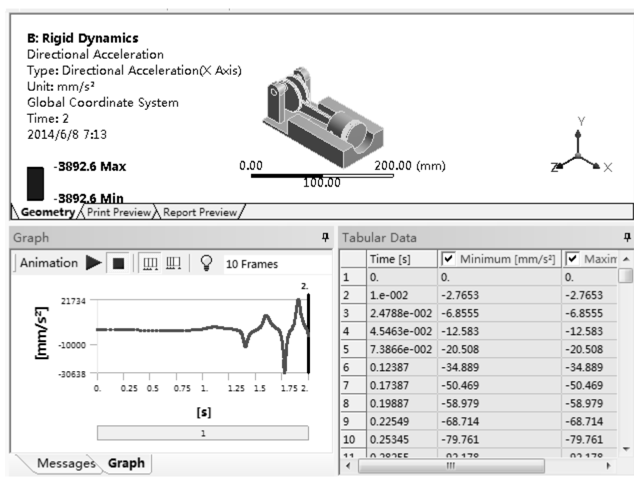


图 10-58　加速度结果图和数据表

7．提取动力学分析结果

1）在加速度结果图中，在响应曲线上选择感兴趣的时间点 1s，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Retrieve this Result】命令，如图 10-59 所示。

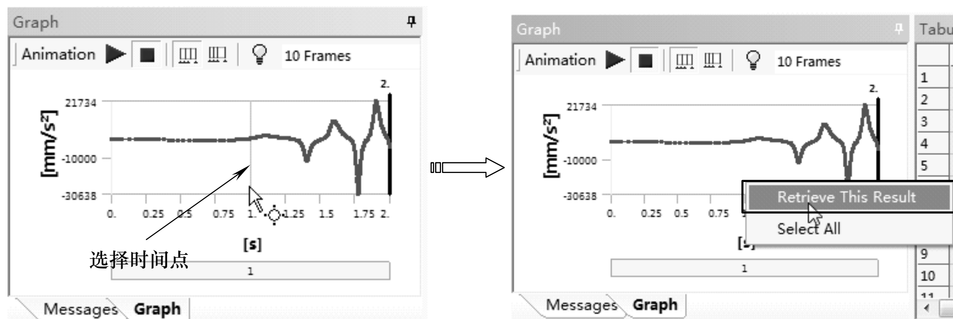


图 10-59　提取加速度结果

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点下的【Directional Acceleration】项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Export Motion Loads】命令，弹出【另存为】对话框。接受程序默认设置，单击【保存】按钮保存结果，如图 10-60 所示。

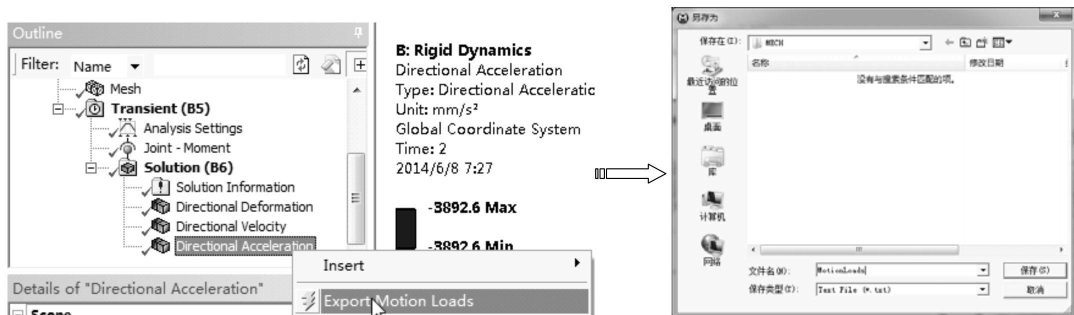


图 10-60　保存结果

3）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

8．启动静力学分析

1）选择项目 B 中第一个单元格，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Duplicate】命令，复制得到项目 C，如图 10-61 所示。

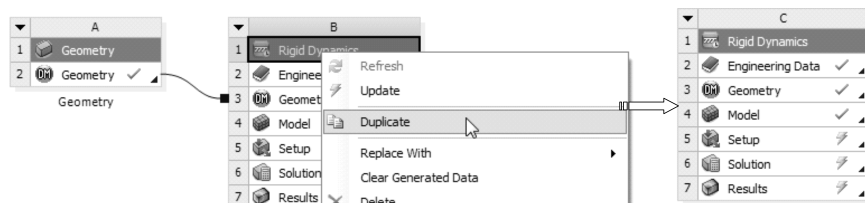


图 10-61　复制项目

2）选择项目 C 中第一个单元格，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Replace With】|【Static Structural】命令，将项目 C 转换成静力学分析项目，如图 10-62 所示。

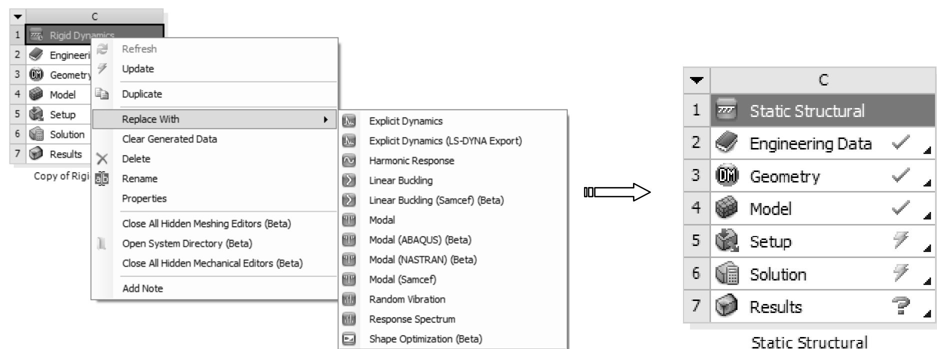


图 10-62　转换静力学分析项目

9．加载求解静力分析

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C4 栏中的【Model】项，进入 Mechanical 界面。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Model（C4）】节点下的【连杆-1】项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Suppress All Other Bodies】命令，仅显示连杆，抑制所有其他体，在详细设置窗口中设置【Stiffness Behavior】为 Flexible，如图 10-63 所示。

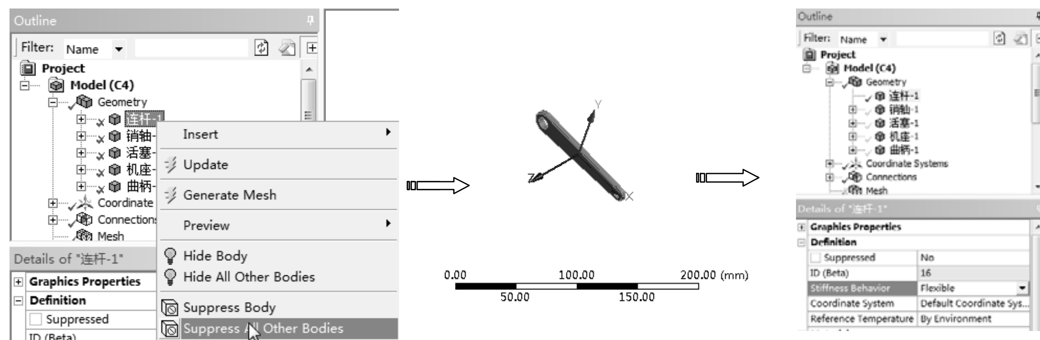


图 10-63　抑制体

3）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（C5）】节点下的【Joint-Moment】项，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Delete】命令，删除关节载荷，同理删除刚体分析的结果项，如图 10-64 所示。

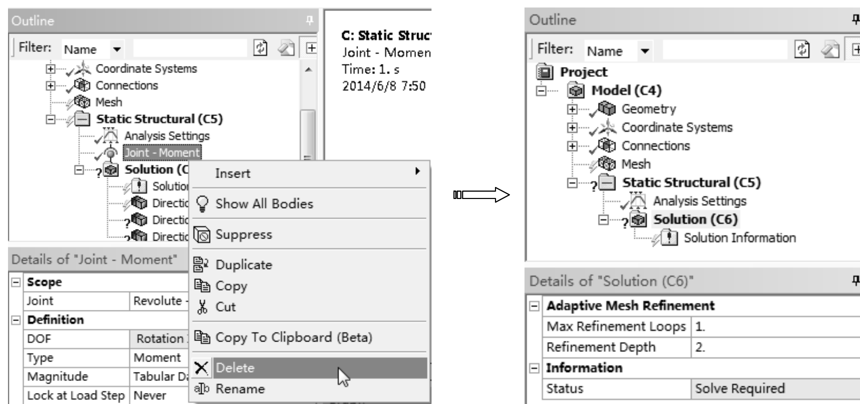


图 10-64　删除关节载荷和刚体分析结果

4）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（C5）】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert】|【Motion Loads】命令，如图 10-65 所示。

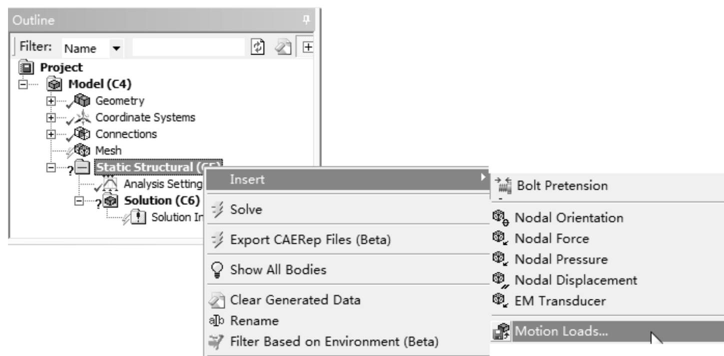


图 10-65　插入运动载荷

5）系统弹出【打开】对话框，选择刚体分析中保存的结果文件，单击【打开】按钮，导入一系列载荷施加到模型上，包括 Remote Force 和 Moment，如图 10-66 所示。

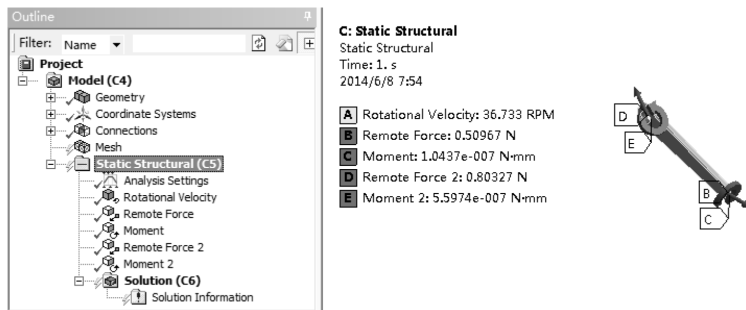


图 10-66　加载刚体运动载荷

6）求解变形。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 10–67 所示。

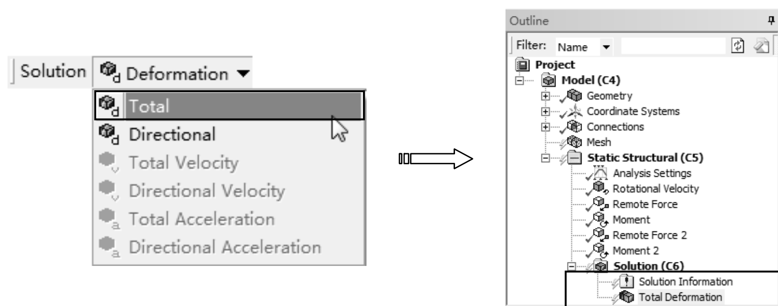


图 10–67 添加变形求解项

7）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises）】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 10–68 所示。

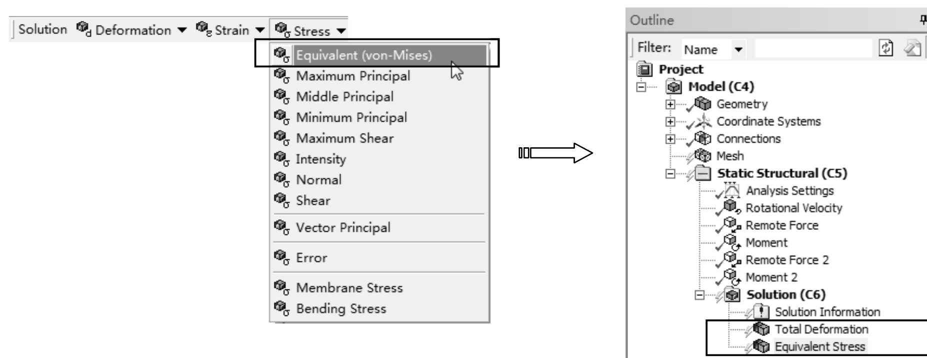


图 10–68 添加应力求解项

8）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 10–69 所示。

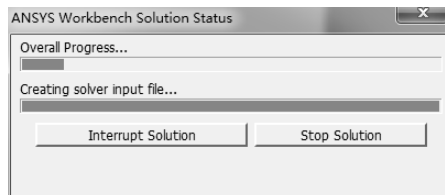


图 10–69 求解进度条

9）变形云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出变形云图。选择【Result】工具栏上的【1.0 （True Scale）】项，可真实显示变形云图，如图 10–70 所示。

10）应力云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图。选择【Result】工具栏上的【1.0 （True

Scale)】项，可真实显示应力云图，如图 10-71 所示。

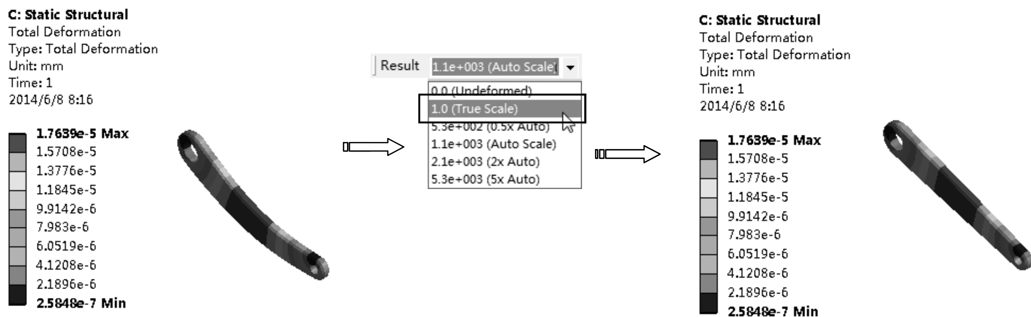


图 10-70　变形云图

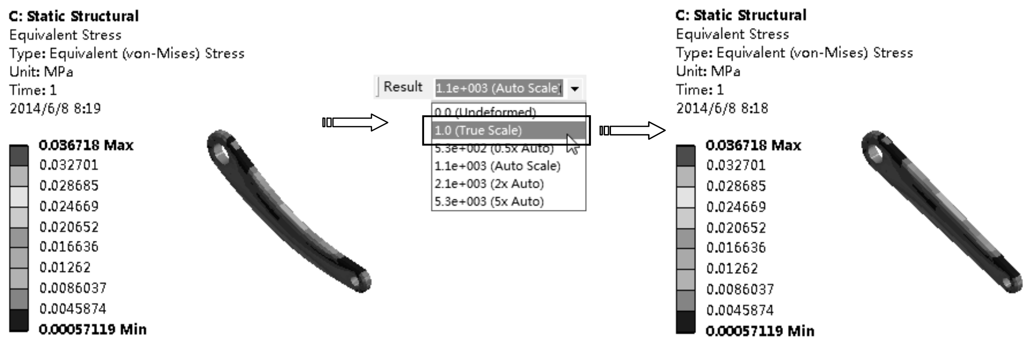


图 10-71　应力云图

10．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

10.3.4　实例总结

本节以压气机为例讲解了 ANSYS Workbench 的刚体与静力学有限元分析的方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：要利用刚体分析结果进行静力学分析，首先要生成运动载荷文件，然后将其加载到静力学中作为施加的载荷，然后再进行静力学分析。

10.4　实例 3——门机构运动分析

10.4.1　实例说明

如图 10-72 所示门机构，门在 6s 内转动 90°，试分析门随时间的位移以及弹簧伸长、弹簧力等。

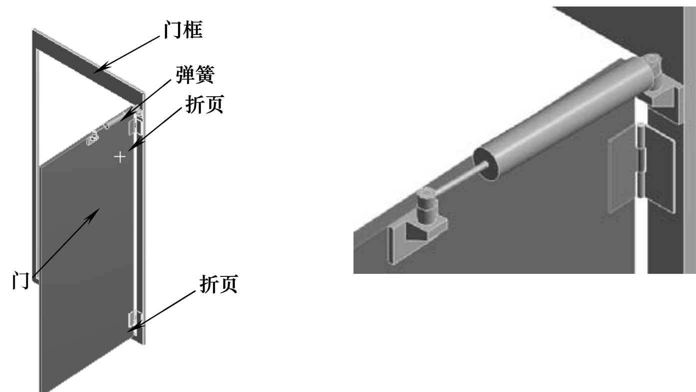


图 10-72　门结构

10.4.2　分析思路

在进行刚体动力学分析时，为了模拟空气弹簧在开关门时的效果，在活塞和活塞杆设置弹簧，弹簧刚度为 1N/mm，阻尼为 5N·s/mm，通过探测方式得到弹簧的力、位移、速度等待求参数。

10.4.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 10-73 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 10-74 所示。

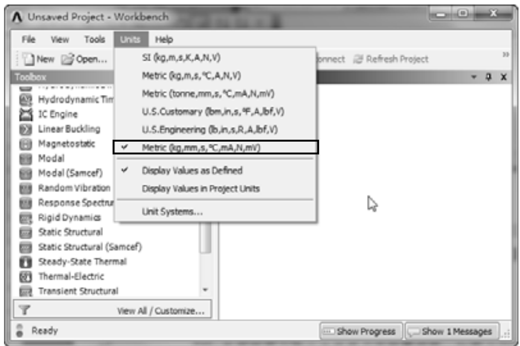


图 10-73　设置分析单位



图 10-74　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Rigid Dynamics】选项上按住

鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 10-75 所示。

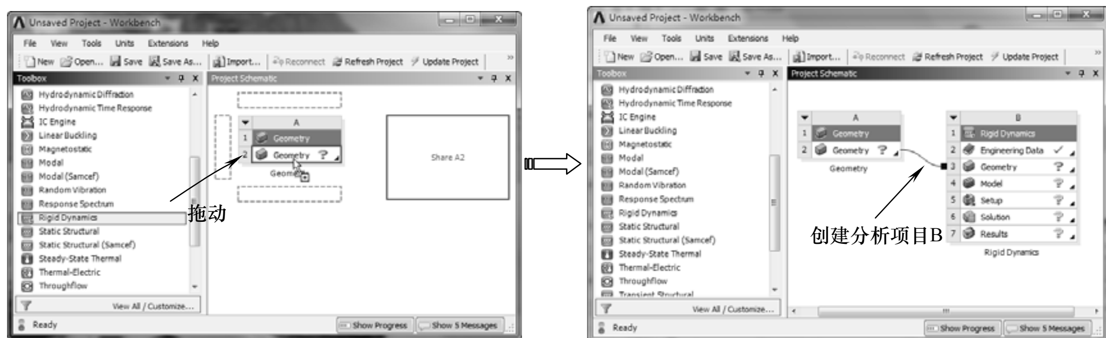


图 10-75　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 10-76 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter10\10.4\uncompleted\door.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的 变为 ，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 10-77 所示。

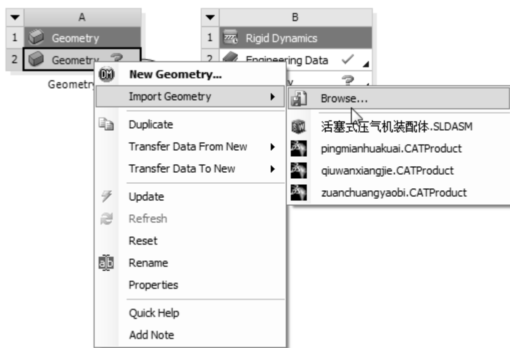


图 10-76　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

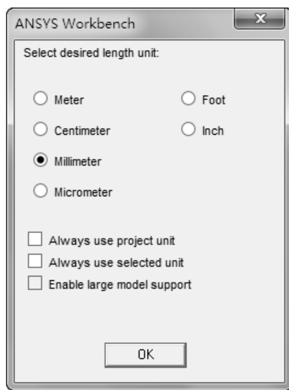


图 10-77　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示 ，表示需要生成，图形窗口没有图形显示，单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 10-78 所示。

5）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（yaqiji.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

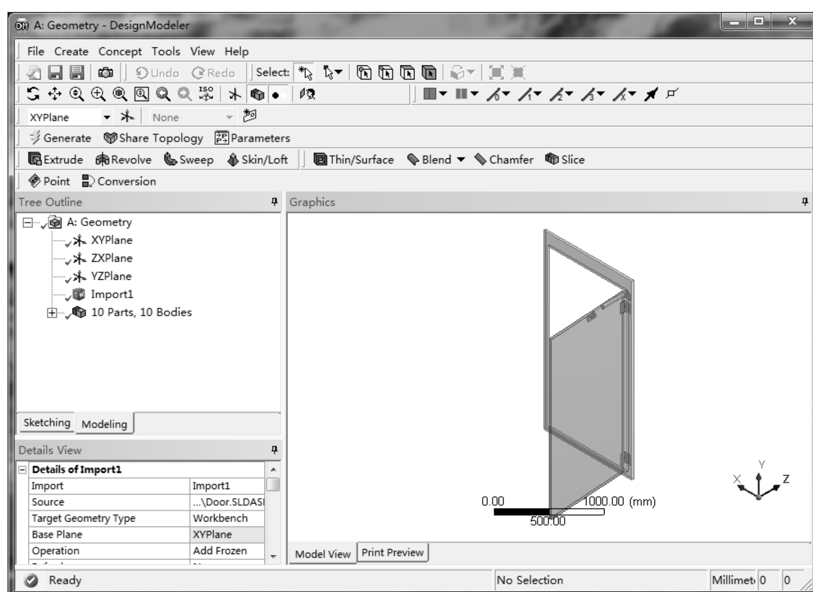


图 10-78　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

3．定义连接

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏中的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）展开窗口左侧【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Deleted】命令，删除默认的接触设置，如图 10-79 所示。

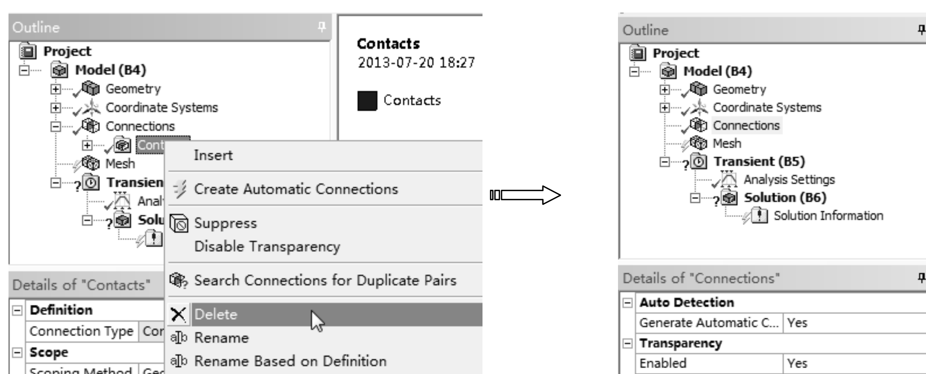


图 10-79　删除默认接触设置

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】节点，单击【Connections】工具栏上的【Body-Ground】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-Ground To No Selection】节点。选择如图 10-80 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-80 所示。

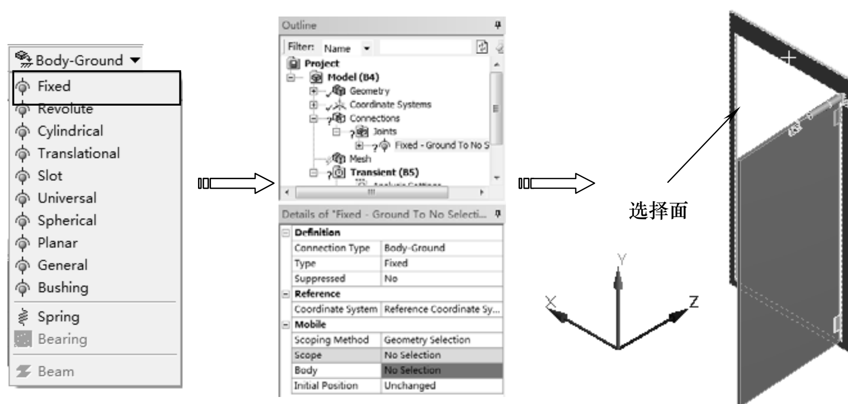


图 10-80　固定

4）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-81 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

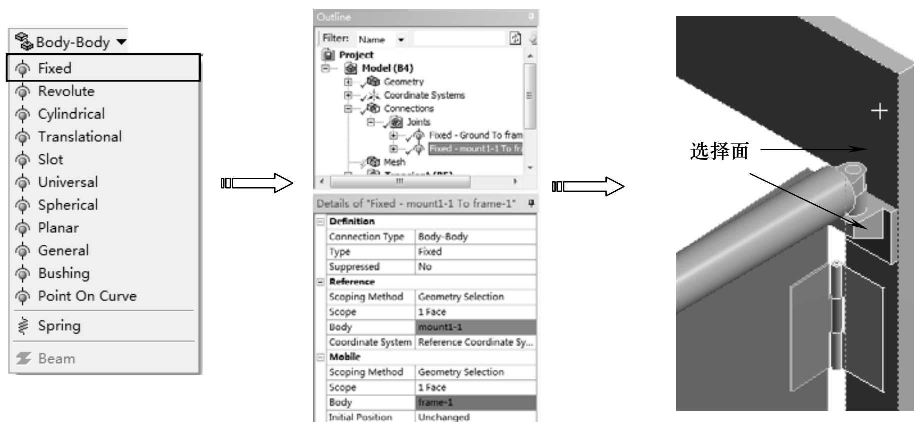


图 10-81　刚体固定

5）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-82 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

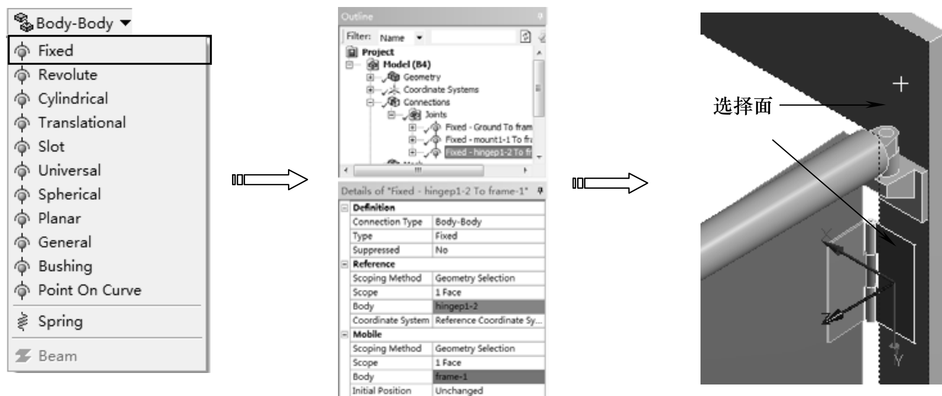


图 10-82　刚体固定

6）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-83 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

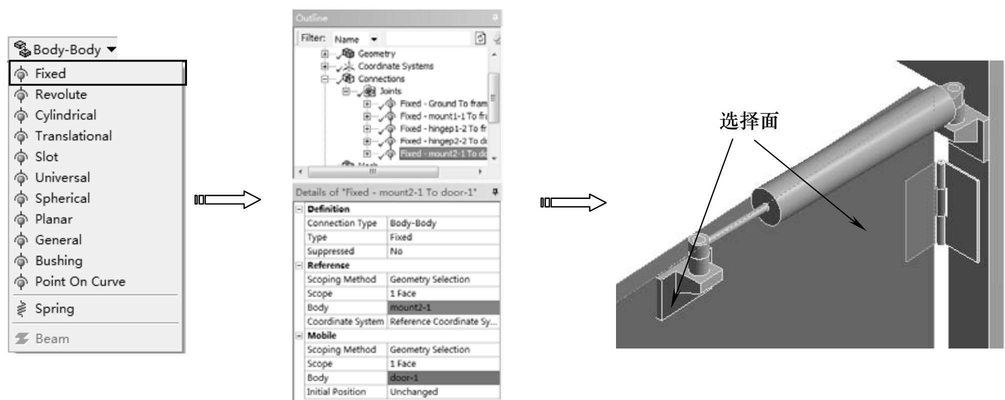


图 10-83　刚体固定

7）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-84 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

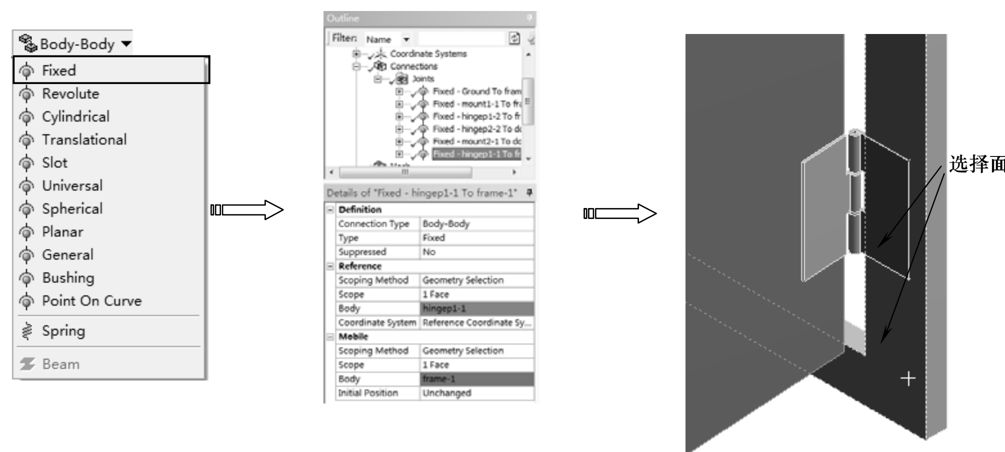


图 10-84　刚体固定

8）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Fixed】命令，分析树中增加【Fix-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-85 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成。

9）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Cylindrical】命令，分析树中增加【Cylindrical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-86 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-86 所示。

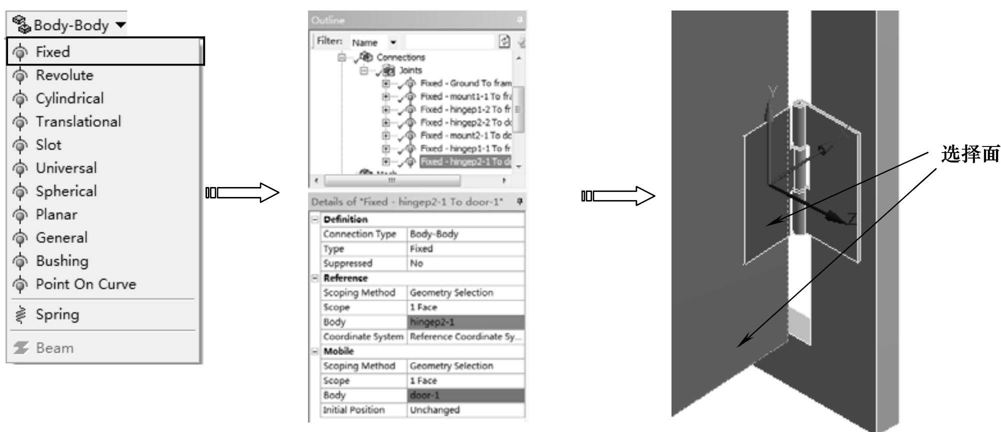


图 10-85　刚体固定

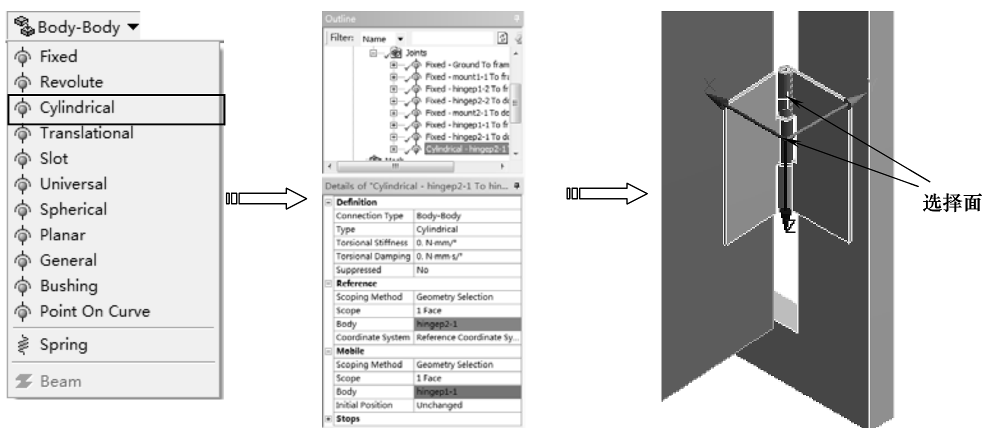


图 10-86　创建柱面运动副

10）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Revolute】命令，分析树中增加【Revolution-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-87 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-87 所示。

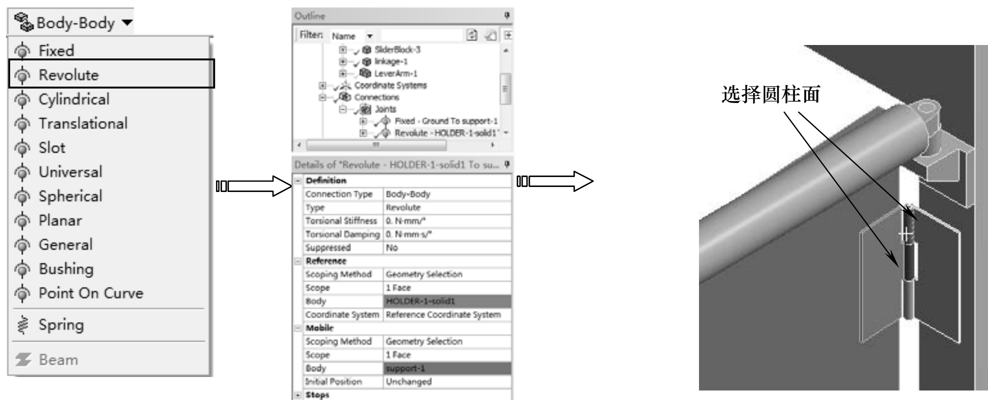


图 10-87　创建旋转副

11）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Cylindrical】命令，分析树中增加【Cylindrical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-88 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-88 所示。

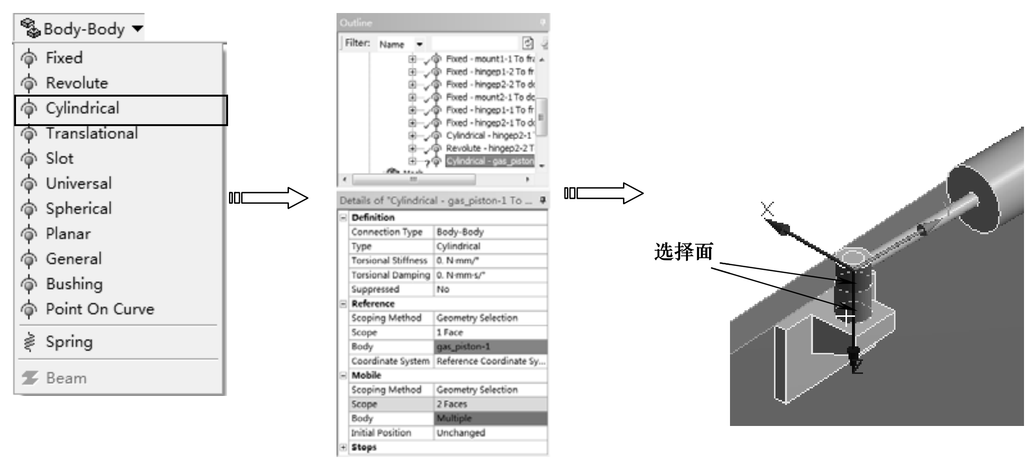


图 10-88 创建柱面运动副

12）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Cylindrical】命令，分析树中增加【Cylindrical-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-89 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-89 所示。

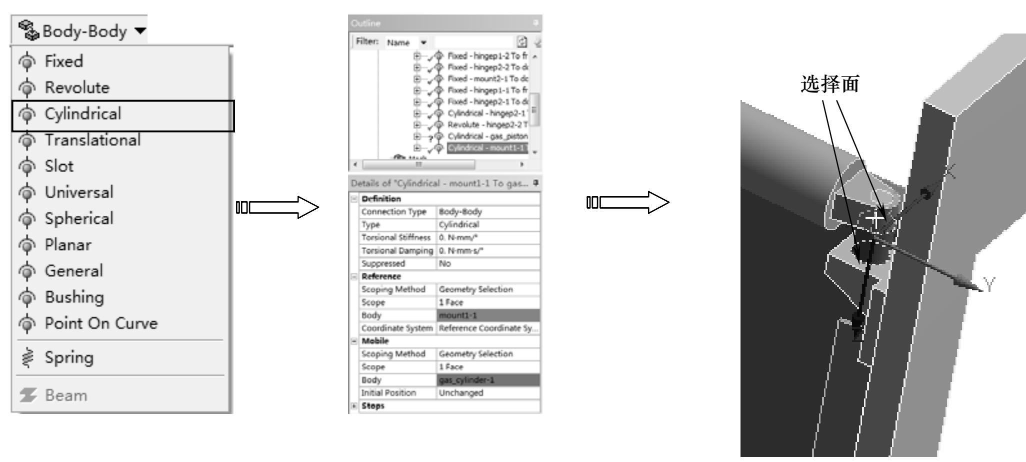


图 10-89 创建柱面运动副

13）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Translational】命令，分析树中增加【Translational-No Selection To No Selection】节点。分别选择如图 10-90 所示的表面，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-90 所示。

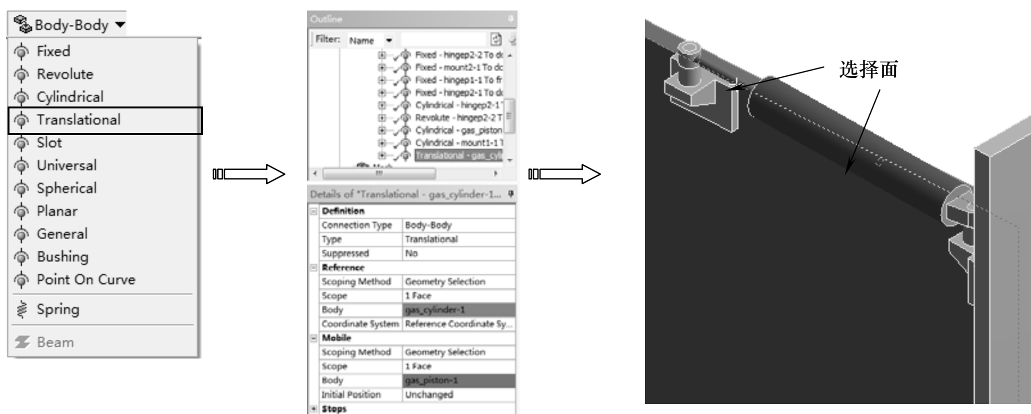


图 10-90　创建移动副

14）单击【Connections】工具栏上的【Body-Body】|【Spring】命令，分析树中增加【Spring-No Selection To No Selection】节点。设置【Longitudinal Stiffness】为 1N/mm，【Longitudinal Damping】为 5N·s/mm，分别选择如图 10-91 所示的边，单击详细设置窗口中的【Reference】和【Mobile】列表中【Body】下的【Apply】按钮完成，如图 10-91 所示。

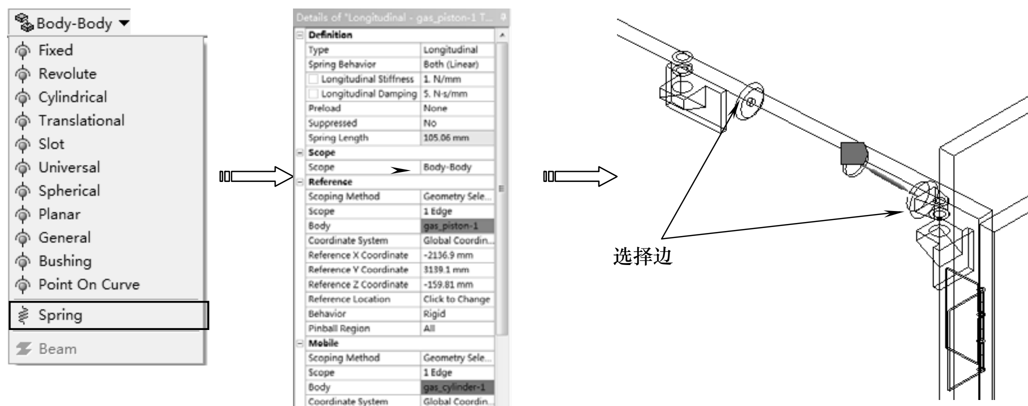


图 10-91　弹簧

4．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点下的【Analysis Settings】节点，在详细设置窗口中设置【Step End Time】为 6s，如图 10-92 所示。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Transient（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Joint Load】命令，在详细设置窗口的【Joint】下拉列表中选择 Revolute 关节，在【Type】下拉列表中选择 Rotation，设置【Magnitude】为 Tabular Data，输入角度如图 10-93 所示。

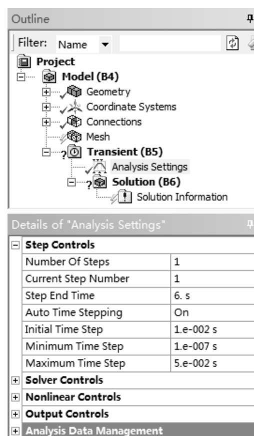


图 10-92　Analysis Settings

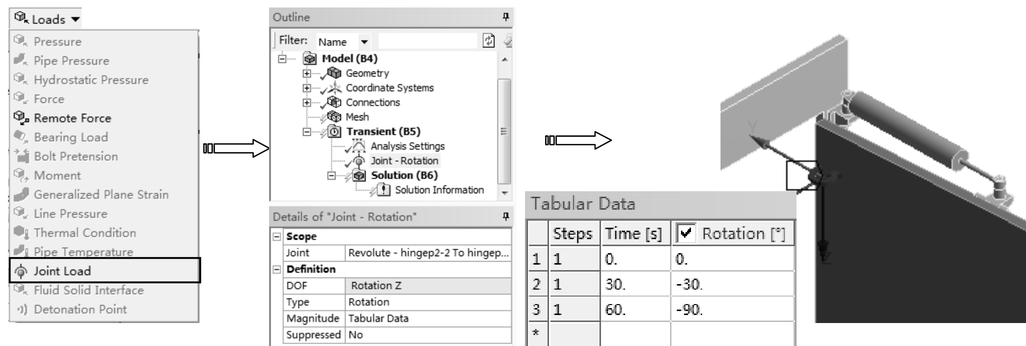


图 10-93　施加旋转角

5. 设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解位移。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，在图形区选择如图 10-94 所示的实体，在详细设置窗口中设置【Orientation】为 Y Axis，如图 10-94 所示。

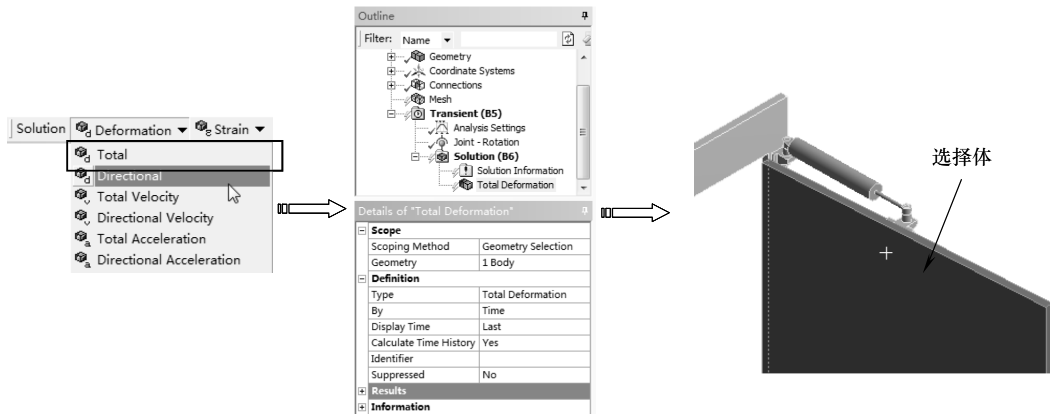


图 10-94　添加位移求解项

6. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 10-95 所示。

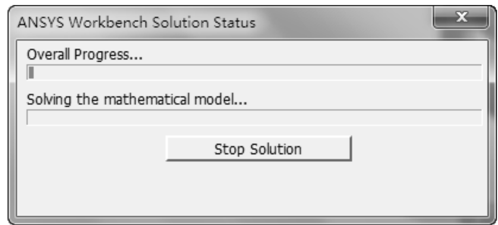


图 10-95　求解进度条

2）位移结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Directional Deformation】项 Directional Deformation，在图形窗口显示位移结果，如图 10-96 所示。

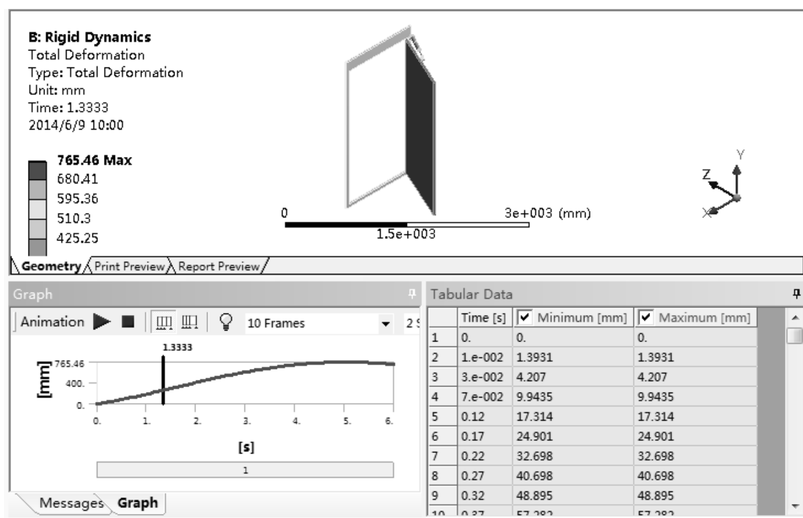
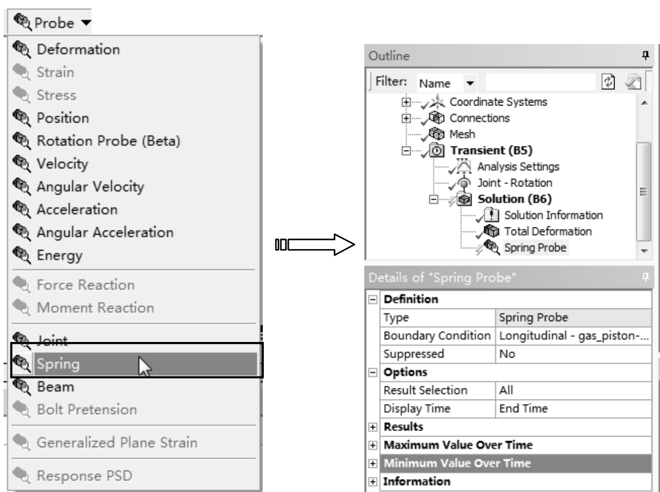


图 10-96　位移结果图和数据表

3）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。单击【Solution】工具栏上的【Probe】|【Spring】命令，此时在分析树中插入【Spring Probe】项，在详细设置窗口中设置【Boundary Condition】为弹簧连接，如图 10-97 所示。

4）在【Outline（分析树）】中选择【Spring Probe】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令进行求解，如图 10-98 所示。



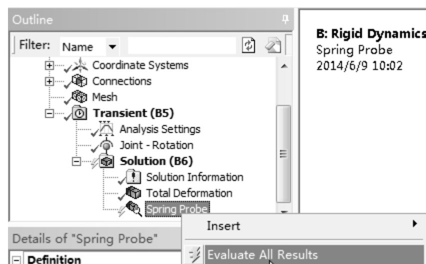


图 10-97　插入弹簧探测　　　　图 10-98　求解弹簧探测

5）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Spring Probe】项，在图形窗口显示弹簧力、长度和速度结果，如图 10-99 所示。

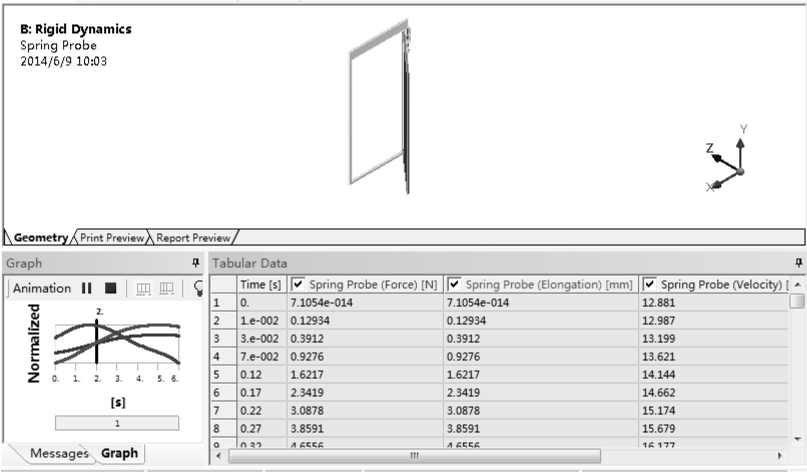


图 10-99　弹簧探测结果图和数据表

7. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save ，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

10.4.4　实例总结

本节以门运动为例讲解了 ANSYS Workbench 的刚体动力学分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：弹簧作为弹性单元用于储存机械能，当载荷去除后恢复原状，弹簧可为纵簧或扭簧，可具有弹簧刚度和阻尼。

10.5　本章小结

本章首先讲解了 ANSYS Workbench 刚体动力学分析的基础知识，包括分析流程、分析设置、定义连接、载荷和约束等，然后介绍了 3 个典型案例。读者学习后举一反三，可以运用 ANSYS Workbench 完成多种项目的刚体动力学仿真分析。

第 11 章　ANSYS 14.5 Workbench 结构热分析实例

结构热分析主要包括热传导、热对流和热辐射，在工程应用中至关重要。本章将首先对 ANSYS Workbench 软件的热分析模块进行详细讲解，然后结合典型案例介绍稳态热分析和瞬态热分析的方法和步骤，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。

11.1　结构热分析概述

热分析遵循热力学第一定律，即能量守恒定律。传热，即热量传递，凡是有温差存在的地方，必然有热的传递。传热是极为普遍的一种能量传递过程，例如，物料的加热、冷却或者冷凝、蒸发过程；设备和管道的保温，以减少热损失；生产中热能的合理利用，废热回收。

11.1.1　传热方式

热的传递是由于物体内部或物体之间的温度不同而引起的。当无外功输入时，根据热力学第二定律，热总是自动地从温度高的部分传递到温度低的部分。根据传热机理的不同，传热的基本方式有：热传导、对流和辐射 3 种。

1．热传导

当物体的内部或两个直接接触的物体之间存在温差，且物体各部分之间不发生相对位移时，依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递称为热传导，如图 11-1 所示。

热传导遵循傅里叶定律：

$$q'' = -k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}$$

式中，q'' 为热流密度（$\mathrm{W/m^2}$）；k 为材料的热导率；负号表示热量流向温度降低的方向。

热导率是物质的一种物理性质，表示物质的导热能力的大小，热导率值越大，物质的导热性能越好。热导率只能实际测定。一般而言，金属的热导率最大，非金属固体的热导率次之，液体的热导率较小，而气体的热导率最小，如图 11-2 所示。

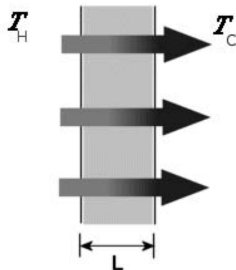


图 11-1　热传导

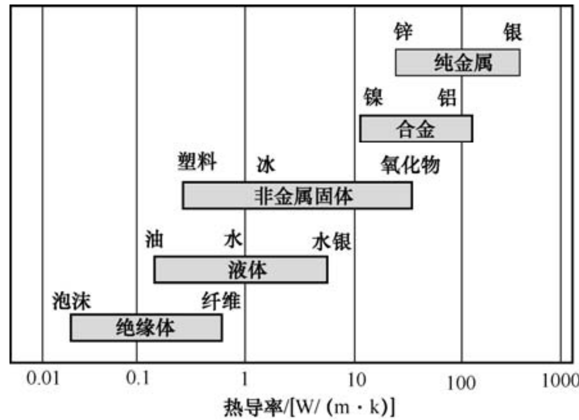


图 11-2　不同材料的热导率

2．对流

固体的表面与它周围接触的流体之间，由于温差的存在而引起的热量交换称为对流换热，如图 11-3 所示。

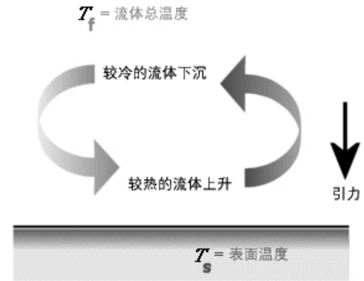


图 11-3　对流

根据引起对流的原因，可将对流分为：自然对流和强制对流。

- ✧ 自然对流：在自然对流下，固体表面附近的流体流动是由浮力引起的，浮力是由流体密度发生变化引起的，而密度的变化又是由固体与流体之间的温差导致的。将热板放在空气中冷却时，板表面附近的空气微粒变得较热，密度降低，因此会向上移动，如图 11-4 所示。
- ✧ 强制对流：通过外部方式（如风扇或泵）来加速流体在固体表面的流动。流体微粒在固体表面的快速运动使温度梯度最大化，并增加了热交换速率。在热盘上强迫扩散空气，如图 11-5 所示。

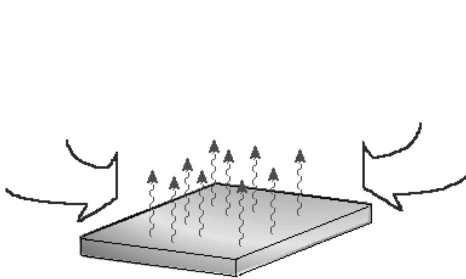


图 11-4　自然对流

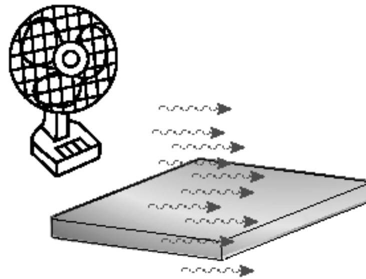


图 11-5　强制对流

对流换热遵循牛顿冷却公式：

$$q" = h(T_s - T_f)$$

式中，$q"$ 为热流密度（W/m^2）；h 为对流换热系数（或称为膜传热系数、给热系数、膜系数）（$W/(m^2 \cdot ℃)$）；T_s 为固体表面温度；T_f 为周围流体温度。

对流换热系数的大小与传热过程的许多因素有关，它不仅取决于物体的物性、换热表面的形状、大小、相对位置，而且与流体的流速有关。一般，就介质而言，水的对流换热比空气强；就换热方式而言，有相变的强于无相变的；强制对流强于自然对流。典型的对流换热系数见表 11-1。

表 11-1　典型的对流换热系数

材　　料	对流换热系数	材　　料	对流换热系数
空气（自然对流）	5～25	水（强制对流）	300～6000
空气/过热蒸汽（强制对流）	20～300	水（沸腾）	3000～60000
油（强制对流）	60～1800	蒸汽（压缩）	6000～120000

3．辐射

热辐射是由物体由于其温度的原因而以电磁波的形式发出的热能。温度在绝对零度以上的任何物体都会发出热能。由于电磁波在真空中传播，因此不需要任何介质就可以发生辐射。辐射是在真空中唯一的传热方式，如图 11-6 所示。

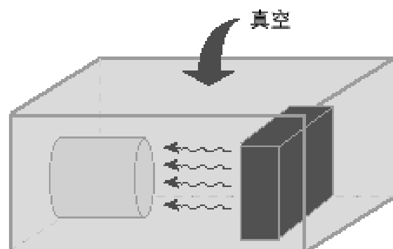


图 11-6　热辐射示意图

热辐射能量遵循斯蒂芬-玻耳兹曼定律：

$$Q = q'' A_1 = \varepsilon\sigma A_1 F_{12}(T_1^4 - T_2^4)$$

式中，q'' 为热流密度（$\mathrm{W/m^2}$）；ε为辐射率（Emissivity），材料的辐射率在 0～1，黑体为 1，理想的反射镜为 0，它取决于物体表面的温度和表面粗糙度；σ为 Stefan-Boltzmann 常数，约为 $5.67\times10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2\cdot K^4)}$；$A_1$ 为辐射面 1 的面积；F_{12} 为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数；T_1、T_2 为辐射面 1 和辐射面 2 的绝对温度。

11.1.2　热分析类型

热分析类型有两种：稳态热分析和瞬态热分析。

1．稳态热分析

在这种分析中，只关心物体达到热平衡状态时的热力条件，而不关心达到这种状态所用的时间。达到热平衡时，进入模型中每个点的热能与离开该点的热能相等。一般来说，稳态热分析所需的唯一材料属性是热导率。

稳态热分析的能量平衡方程以矩阵形式表示：

$$[K]\{T\} = \{Q\}$$

式中，$[K]$为热传导矩阵，包含热系数、对流系数及辐射和形状系数；$\{T\}$为节点温度向量；$\{Q\}$为节点热流率向量，包括热生成。

ANSYS Workbench利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件生成$[K]$、$\{T\}$、$\{Q\}$。在ANSYS Workbench左侧工具箱中的【Analysis Systems】下的【Steady-State Thermal】上按住鼠标右键，拖动到项目管理区，即可创建稳态热分析项目。按照分析项目从上到下的顺序执行热力分析，如图11-7所示。



图11-7 创建稳态热分析项目

2．瞬态热分析

在这种分析中，只关心模型的热力状态与时间的函数关系。例如，热水瓶设计师知道里面的液体温度最终将与室温相等（稳态），但设计师感兴趣的是找出液体的温度与时间的函数关系。在指定瞬态热分析的材料属性时，需要指定热导率、密度和比热容。此外，还需要指定初始温度、求解时间和时间增量。

瞬态热分析的能量平衡方程以矩阵形式表示：

$$[C]\{\dot{T}\}+[K]\{T\}=\{Q\}$$

式中，$[C]$为比热矩阵；$\{\dot{T}\}$为温度对时间的导数；$[K]$为热传导矩阵，包含热系数、对流系数及辐射和形状系数；$\{T\}$为节点温度向量；$\{Q\}$为节点热流率向量，包括热生成。

在瞬态热分析中分析设置与稳态热分析有所不同。分析设置（Analysis Settings）中的步长控制（Step Controls）用于定义瞬态分析的结束时间（Step End Time），控制时间步长（Time Step）或生成多载荷步长（Number of Steps）等，如图11-8所示。

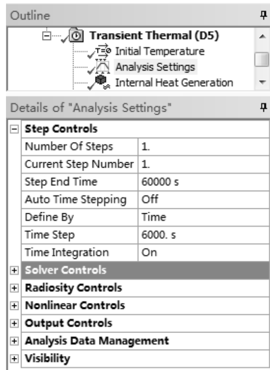


图11-8 步长控制（Step Controls）

- ✧ Step Time（时间步长）：对于瞬态分析，在热梯度大的区域（如淬火体的表面），热流方向的最大单元尺寸和能够得到好结果的最小时间步长有一定关系。因此，建议不要采用特别小的时间步长，特别是当建立初始条件时，很小的数可能导致计算错误。
- ✧ Auto Time Stepping（自动时间步）：在瞬态分析中也称为时间步优化，使程序自动确定子步间的载荷增量。同时，它根据分析模型的响应情况，自动增、减时间步大小。在瞬态分析中，响应检测基于热特征值。对于大多数问题，都应该打开自动时

间步长功能并设置积分时间步长的上下限，这有助于控制时间步长的变化量。

✧ Time Integration（时间积分）：用于设置是否包括结构惯性力，热容之类的瞬态效应。在瞬态分析中，时间积分效应默认是打开的，如果将其设置为 OFF，ANSYS 将进行稳态分析。

11.1.3　热分析中的接触

当导入实体零件组成的装配体时，实体间的接触区将会被自动创建。面与面或面与边接触允许实体零件间的边界上有不匹配的网格。

提示：每个接触区都用到接触面和目标面的概念。接触区一侧由接触面组成，另一侧由目标面组成，当一侧为接触面另一侧为目标面时，称为反对称接触。如果两侧都为接触面或目标面，则称为对称接触。在热分析中，指定哪侧是接触面，或是目标面并不重要。接触主要实现装配体中零件的传热。

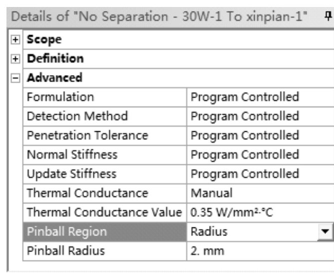
1．接触区传热

热量在接触区内沿着接触法向流动，不管接触区定义如何，只要接触方向上有接触单元，热量就能流动。在接触面与目标面中，不考虑热量扩散。如果零件初始有接触，零件间就会发生传热，如果零件初始不接触，零件间将不会存在传热。对于不同接触类型，热量在接触面和目标面间是否传递的情况见表 11-2。

表 11-2　接触区传热

接触类型	接触区是否传热		
	初始接触	弹球区内	弹球区外
绑定、不分离	是	是	否
粗糙、无摩擦、摩擦	是	否	否

【接触】详细设置窗口中的【Pinball】区域决定了什么时候发生接触，系统自动设置为一个相对较小的值，以协调模型中可能出现的小间隙。如接触为 Bonded（绑定）或 No Separation（不分离），那么当面出现在 Pinball 半径内时就会发生热传导，如图 11-9 所示。



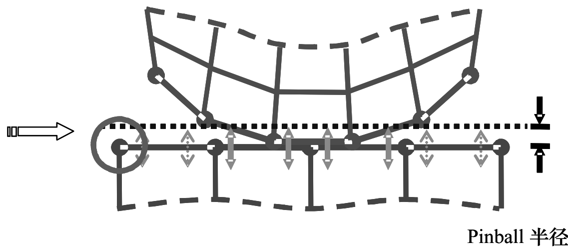


图 11-9　Pinball 示意图

2．接触热阻

默认情况下，假设部件间是完美的热接触传导，意味着界面上不会发生温度差。实际情况下，接触面存在表面光滑度、表面粗糙度、氧化物、包埋液、接触压力、表面温度、使用

导电脂等不良条件导致两个接触表面存在温差，如图 11-10 所示。

两个接触表面间的界面上，存在两种热传导方式：一种是固体间点相接触面组上的热传递，这是非常有效的一种方式；另一种是通过空气间隙层的热传导，因为气体的热导率较低，所以这种方式传热效果较差。

当接触面存在温差时，在装配体零件间会定义一个高的接触传热系数 T_{CC}，单位为 $W/m^2 \cdot ℃$，此时穿过接触界面的热流速由接触热通量 q 决定：

图 11-10　接触温差

$$q = T_{CC} \cdot (T_{target} - T_{contact})$$

式中，$T_{contact}$ 是一个接触节点上的温度；T_{target} 是对应目标节点上的温度。默认情况下，基于模型中定义的最大材料导热性 K_{XX} 和整个几何边界框的对角线 ASMDIAG，T_{CC} 被赋以一个相对较大的值。

$$T_{CC} = K_{XX} \cdot 10000 / \text{ASMDIAG}$$

通过定义接触传热系数 T_{CC} 使得在接触界面上，可以像接触热阻一样输入接触热传导，这实质上为部件间提供了一个完美的接触传导。

如果已知接触热阻，那么它的相反数除以接触面积就可得到传热系数 T_{CC} 值，常见的传热系数见表 11-3。

表 11-3　传热系数

接触材料	传热系数/[$W/m^2 \cdot ℃$]	接触材料	传热系数/[$W/m^2 \cdot ℃$]
铁/铝	45000	不锈钢/不锈钢	2000～3700
黄铜/黄铜	10000～25000	不锈钢/真空间隙不锈钢	200～1100
铝/铝	2200～12000	陶瓷/陶瓷	500～3000

3．定义热阻

在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】|【Contacts】下的接触节点，在详细设置窗口中【Advanced】选项下的【Thermal Conductance】下拉列表中选择 Manual，在【Thermal Conductance Value】文本框中输入 0.35，如图 11-11 所示。

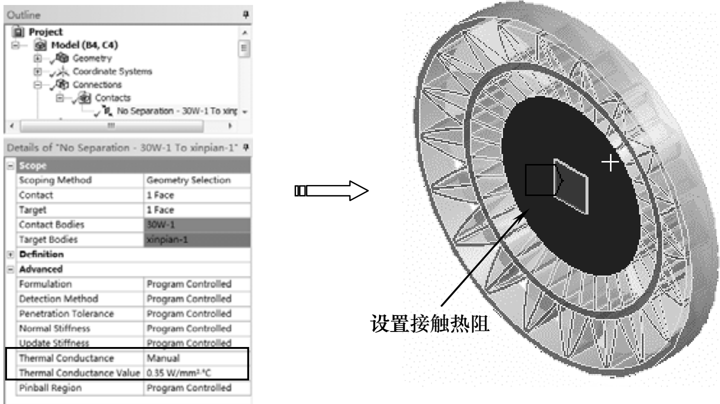


图 11-11　设置接触热阻

提示：传热系数与对流系数类似，单位相同（ W / m^2·℃ ），是指在稳定条件下，维护结构两侧空气温度差为 1℃，单位时间内通过 1m^2 面积传递热量。

11.1.4　热分析中的载荷和边界条件

热分析计算中有两种类型的载荷：热载荷和热边界条件。结构载荷、结构约束和热载荷（有关热载荷将在热分析中介绍）。

- ✧ 热载荷：也称为温度载荷，热载荷会产生一个温度场，使模型中发生热膨胀或热传导，包括热流量（ Heat Flow ）、热通量（ Heat Flux ）、内部热生成（ Internal Heat Generation ）、完全绝热（ Perfectly Insulated ）等。
- ✧ 热边界条件：热边界条件呈现为一个已知的局部或“偏远”的温度条件，作用如同已知温度下的热源，包括恒定温度（ Temperature ）、对流（ Convection ）、辐射（ Radiation ）。

1．热载荷

热载荷包括热流量、热通量、内部热生成、完全绝热等。

（1）Heat Flow（热流量）　热流量是指单位时间内通过传热面的热量，其他单位为：W/t。它可施加在点、边、面上，如图 11-12 所示。线体模型不能直接施加对流和热流密度，施加热流量则很方便，如果输入的值为正，表示热流流入节点，即获取热量。

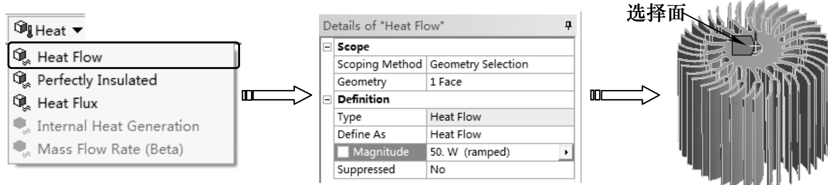


图 11-12　施加热流量

（2）Perfectly Insulated（完全绝热）　完全绝热施加到表面上，可认为是零件热流量加载。在热分析中，当不施加任何载荷时，它实际上就是自然产生的边界条件，即热流量为 0，如图 11-13 所示。

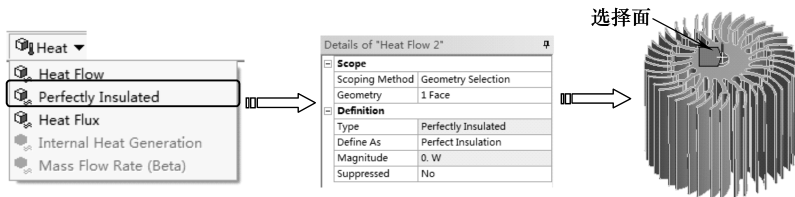


图 11-13　施加完全绝热

通常，不需要给面上施加完全绝热条件，因为这是一个规则表面的默认状态，因此这种加载通常用于删除某个特定面上的载荷。例如，可以先给所有面上施加热流量或对流，然后用完全绝热条件有选择性地“删除”某些面上的载荷（比如与其他零件相接触的面等），此时要方便简单很多。

（3）Heat Flux（热通量或热流密度）　热通量或热流密度是指单位时间内通过单位传热

面积所传递的热量，单位为：W/m^2。热流密度是一种面载荷，当通过单位面积的热流量已知时，可在模型相应的外表面施加一个热流密度，如图 11-14 所示。如果输入的值为正，表示热流流入单元，否则为流出单元。

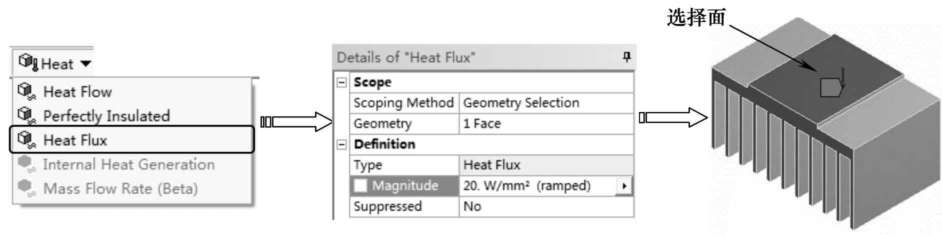


图 11-14　施加热流密度

（4）Internal Heat Generation（内部热生成）　内部热生成为体积载荷，只能施加在体上，可以模拟单元内的热生成，比如化学反应生热或电流生热，单位为 W/m^3，如图 11-15 所示。正的热负荷将会向系统添加能量，如果有多个载荷存在，其效果是累加的。

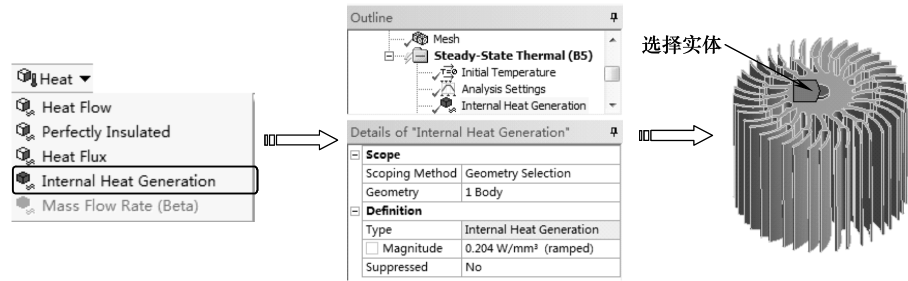


图 11-15　施加内部热生成

2．热边界条件

热边界条件包括恒定温度（Temperature）、对流（Convection）、辐射（Radiation），边界条件至少保证设置一种，否则当热量源源不断地输入到系统中时，稳态时的温度将会达到无穷大。

（1）Temperature（温度）　温度通过作为自由度约束施加到点、边、面或体上，如图 11-16 所示。

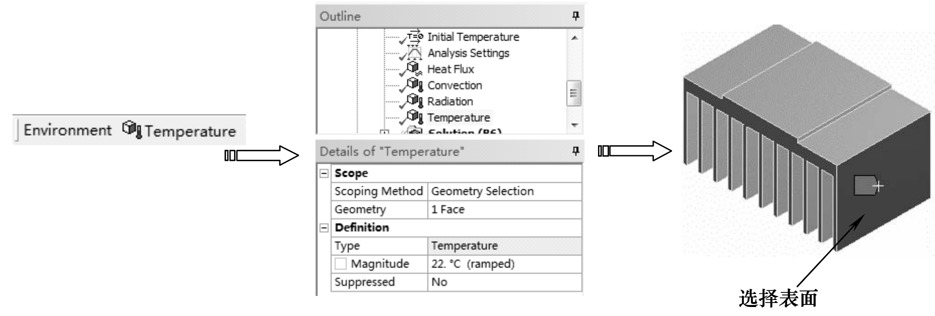


图 11-16　施加温度

（2）Convection（对流）　对流通过与流体接触面发生对流换热，只能施加到表面上，如图 11-17 所示。对流由对流传热膜系数 h（Film Coefficient）给定，既可以是常量，也可以是温度的函数。通过对流传热膜系数将环境温度和表面温度通过公式 $Q = hA(T_{\text{surface}} - T_{\text{ambient}})$ 联

系起来。式中，Q 为热量（热流量）；A 为表面积；T_{surface} 为表面温度；T_{ambient} 为环境温度。

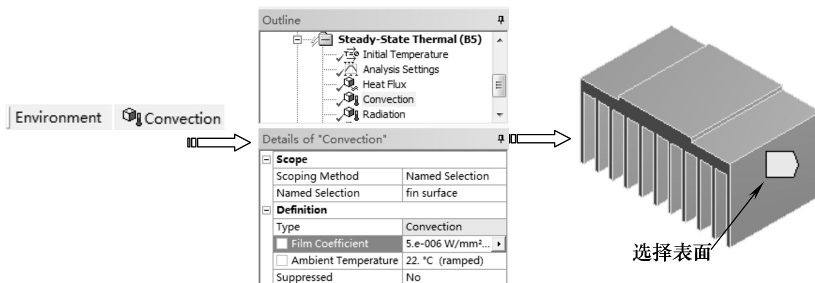


图 11-17　施加对流

（3）辐射（Radiation）　辐射可施加到三维表面或二维模型的边上，提供向周围环境的辐射，以及表面的相互辐射，如图 11-18 所示。对流由辐射率ε（Emissivity）和环境温度（Ambient Temperature）给定，通过公式$Q=\sigma\varepsilon FA(T_{\text{surface}}^4-T_{\text{ambient}}^4)$联系起来。式中，$\sigma$为斯蒂芬-玻耳兹曼常数；$A$ 为辐射面积；F 为辐射面的形状系数（默认为 1）。

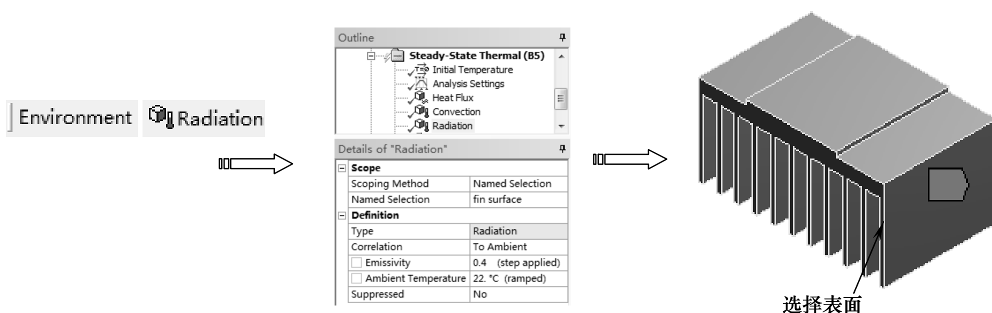


图 11-18　施加辐射

注意：当【Correlation】为 To Ambient 时，则辐射热量以环境温度进行交换；当【Correlation】为 Surface to Surface 时，则辐射热量可在 N 个包围面的两个表面之间进行交换。

11.2　实例 1——芯片稳态热分析

11.2.1　实例说明

如图 11-19 所示为芯片散热结构，包括一个黄铜散热器、一个陶瓷芯片和 3 个黄铜终端。陶瓷芯片产生 25W 热量，通过自身和黄铜散热器的所有表面以对流方式向周围环境散发热量，3 个终端是隔热的，也就是说，它们并不发散热量，试求其稳态温度场。

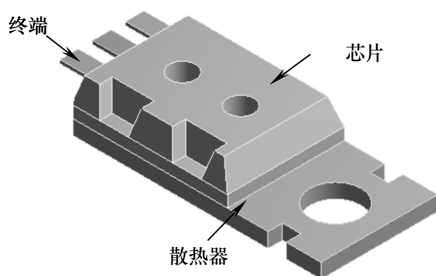


图 11-19　芯片散热结构

11.2.2　分析思路

利用稳态热分析时，可通过内部热生成方式施加

芯片的产热量 25W，芯片与散热器之间胶结可通过接触热阻方式来替代，即把芯片和散热器之间的表面定义为热阻。

11.2.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 11-20 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 11-21 所示。

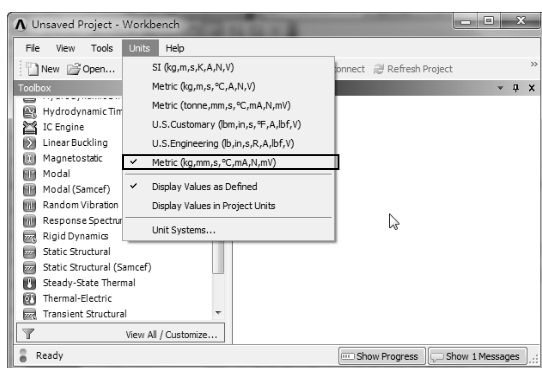


图 11-20　设置分析单位

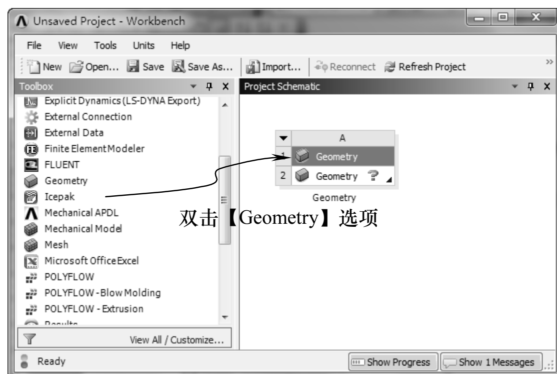


图 11-21　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Steady-State Thermal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 11-22 所示。

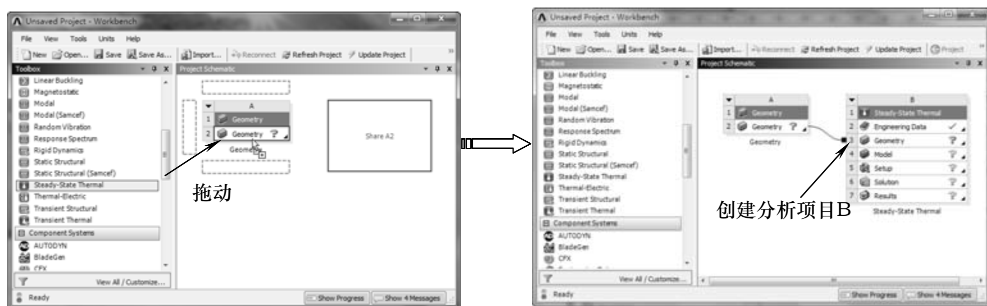


图 11-22　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 11-23 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter11\11.2\uncompleted\regulator.sldasm”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，

表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 11-24 所示。

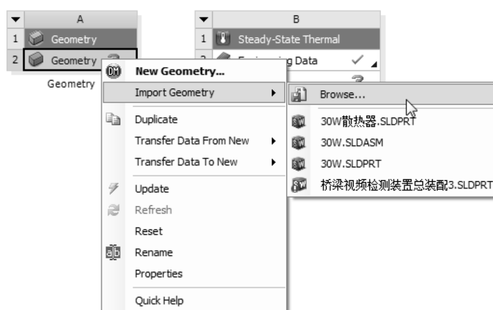


图 11-23　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

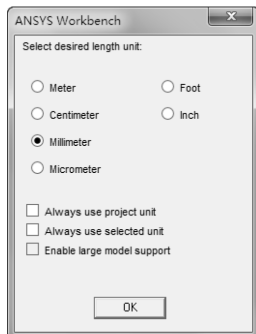


图 11-24　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 11-25 所示。

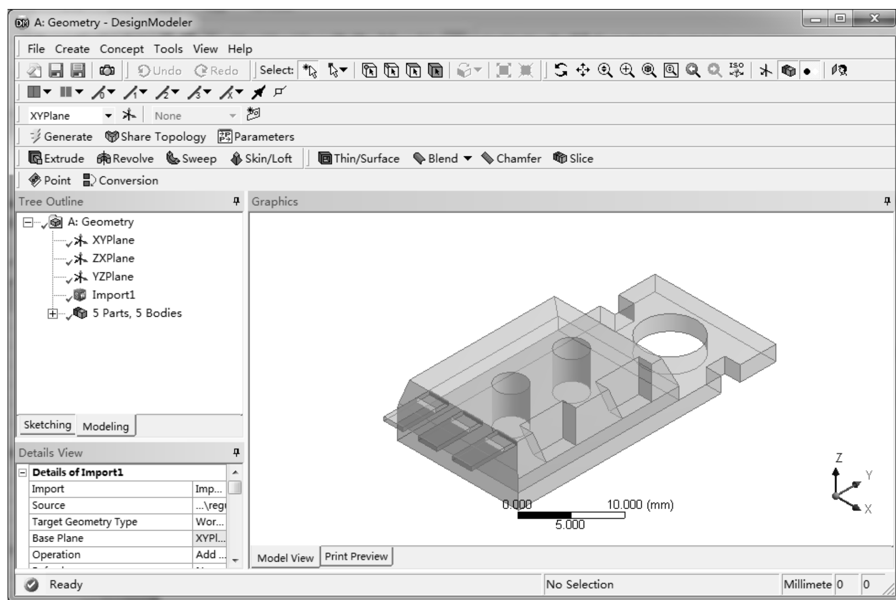


图 11-25　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（chip.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

3．添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入如图 11-26 所示的材料参数设置界面。

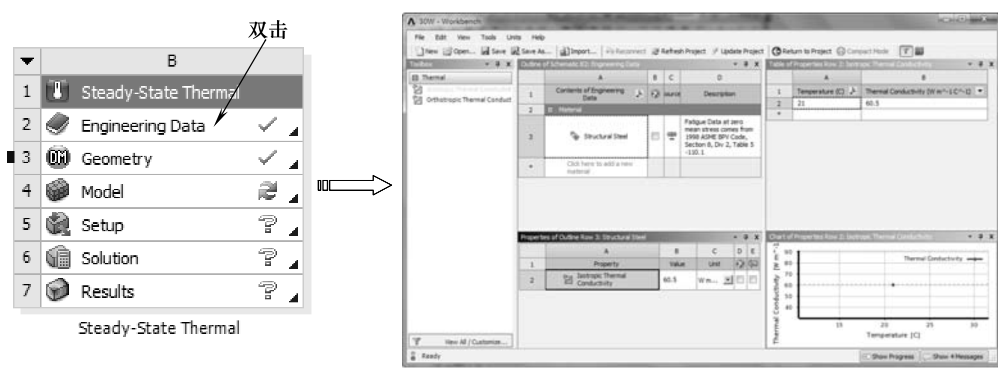


图 11-26　双击【Engineering Data】选项

2）在界面的空白处任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，原界面窗口中的【Outline of Schematic B2：Engineering Data】窗口消失，取代以【Engineering Data Sources（工程数据源）】和【Outline of Favorite（优先列表）】窗口，如图 11-27 所示。

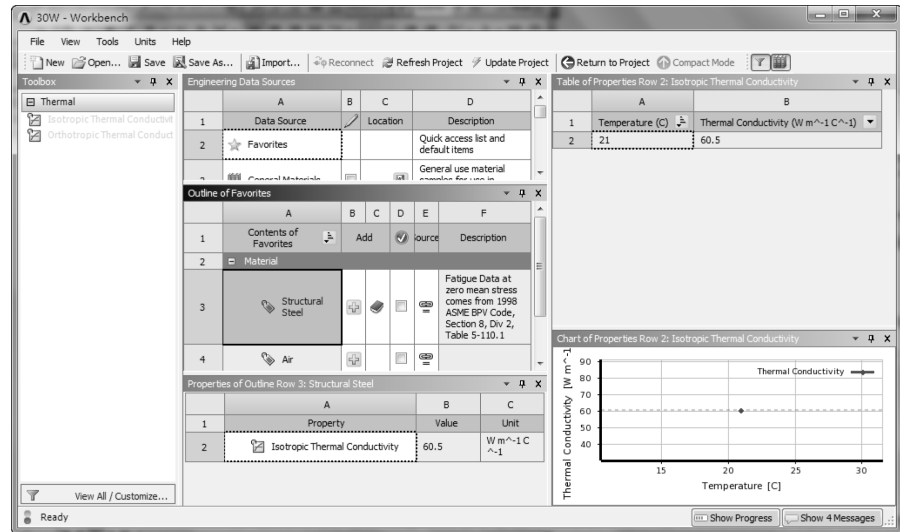


图 11-27　材料参数设置界面

3）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中 A3 栏中的【General Materials（通用材料）】项，出现【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口，如图 11-28 所示。

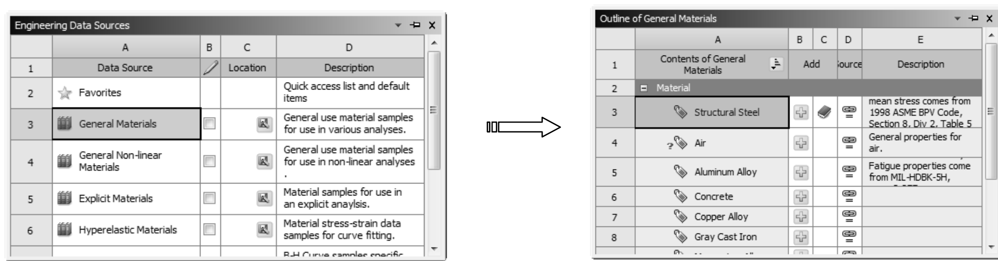


图 11-28　选择 General Materials 材料源

4）在【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口中单击 B10 栏的按钮，此时在

C10 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 11–29 所示。

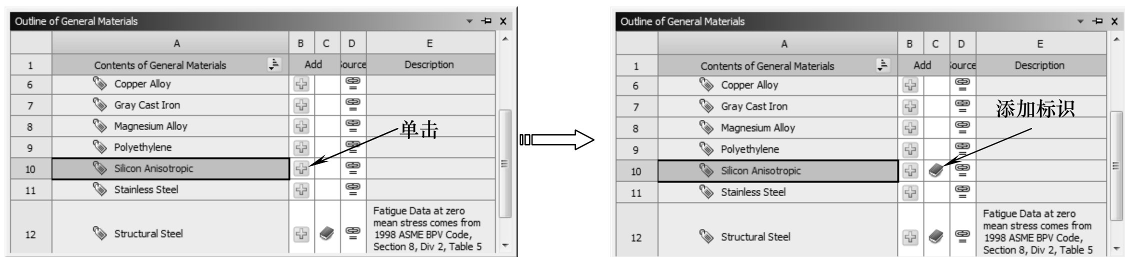


图 11–29　添加 Silicon Anisotropic

5）在【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口中单击 B7 栏的按钮，此时在 C7 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 11–30 所示。

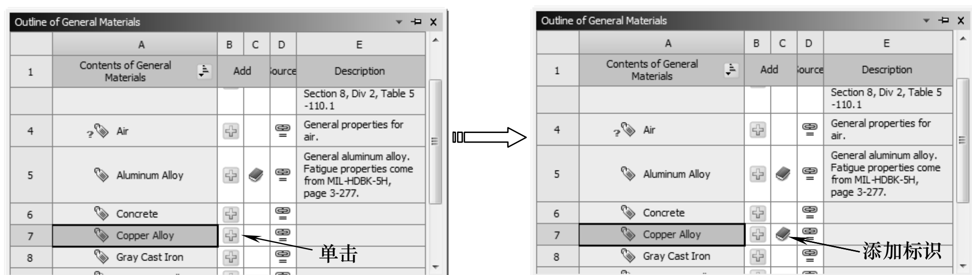


图 11–30　添加 Copper Alloy

6）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口并显示添加的材料，单击 Return to Project 按钮返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 11–31 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 11–32 所示。

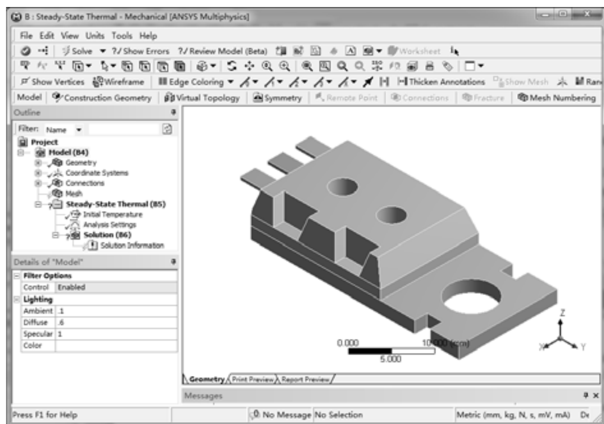


图 11–31　Mechanical 用户界面

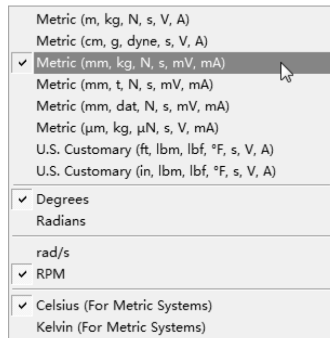


图 11–32　设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的【heat sink-1】，此时在【Details of“heat sink-1”（参数列表）】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】

选项，然后单击▸按钮，选择 Copper Alloy，将材料设置为铜合金，如图 11-33 所示。

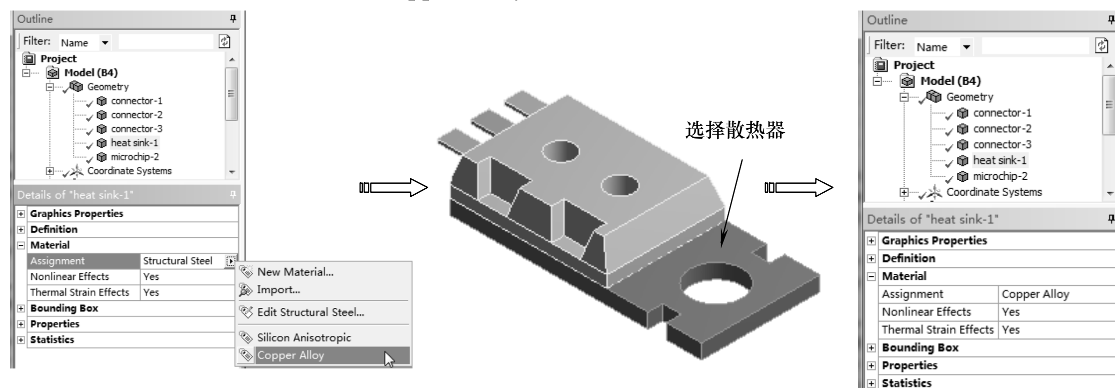


图 11-33　设置散热器材料

4）同理，依次在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的【connector-1】、【connector-2】、【connector-3】，在详细设置窗口中设置【Material】为 Copper Alloy，如图 11-34 所示。

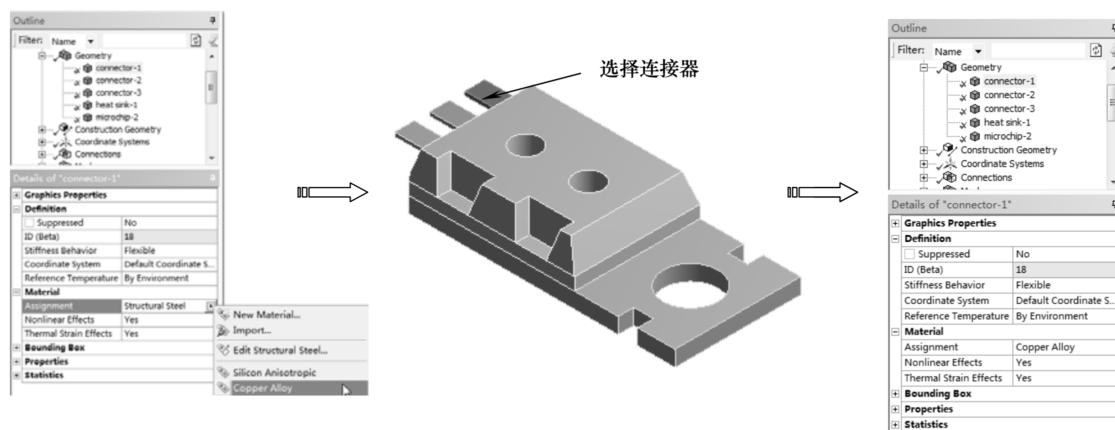


图 11-34　设置连接器材料

5）在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的【microchip-2】，此时在【Details of“microchip-2”（参数列表）】显示模型参数，单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击▸按钮，选择“Silicon Anisotropic”，将材料设置为硅，如图 11-35 所示。

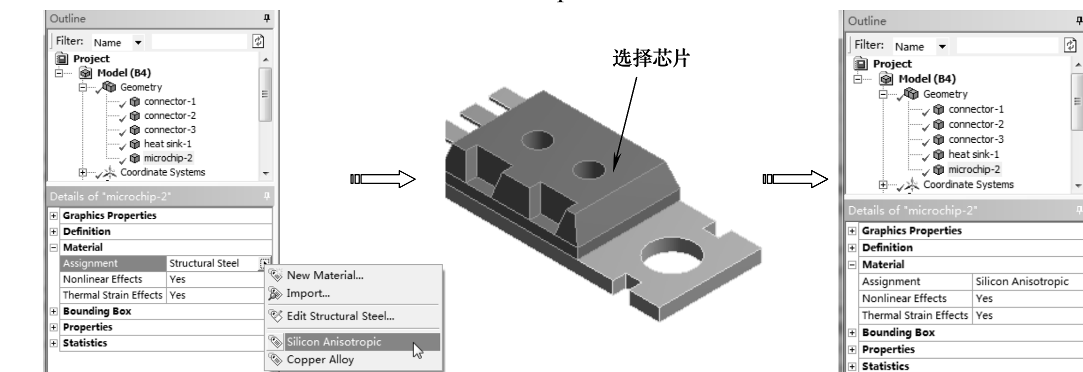


图 11-35　设置芯片材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击窗口上方【图形选择】工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of "Body Sizing" Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 1mm，如图 11-36 所示。

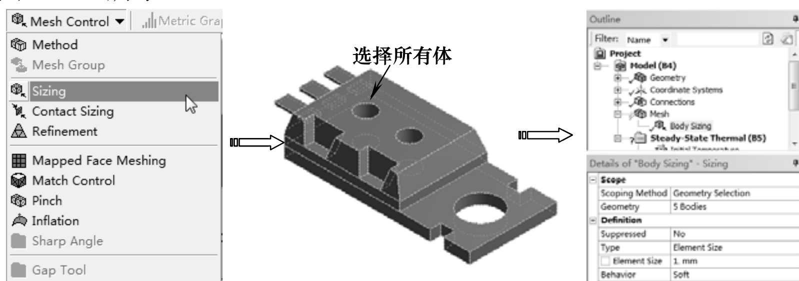


图 11-36　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 11-37 所示。

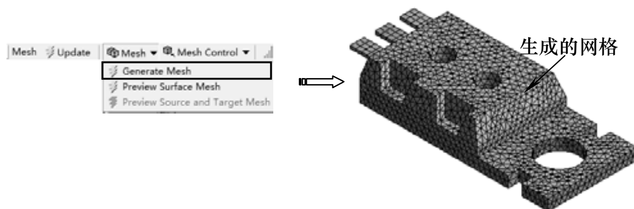


图 11-37　生成网格

6．定义接触热阻

在窗口左侧【Outline（分析树）】中选中【Connections】|【Contacts】下的【Contact Region 4】节点，在详细设置窗口中【Advanced】选项下的【Thermal Conductance】下拉列表中选择 Manual，在【Thermal Conductance Value】文本框中输入 10000，如图 11-38 所示。

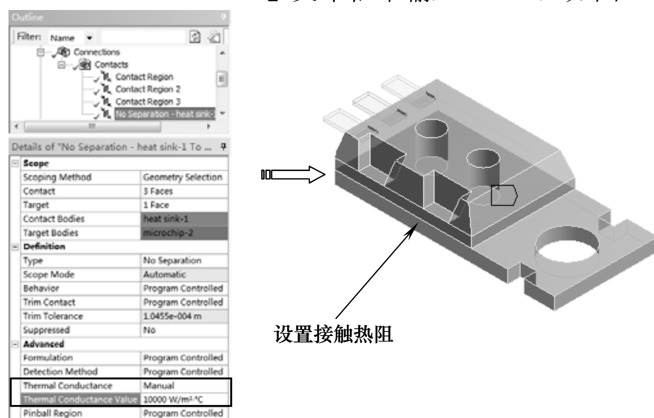


图 11-38　设置接触热阻

7. 施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Steady-State Thermal（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Heat】|【Internal Heat Generation（内部热生成）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Body（选择体）】按钮，选择芯片实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成。在【Details of "Internal Heat Generation"】列表中设置【Definition】选项下的【Magnitude】为 1.76e7W/m^3，如图 11-39 所示。

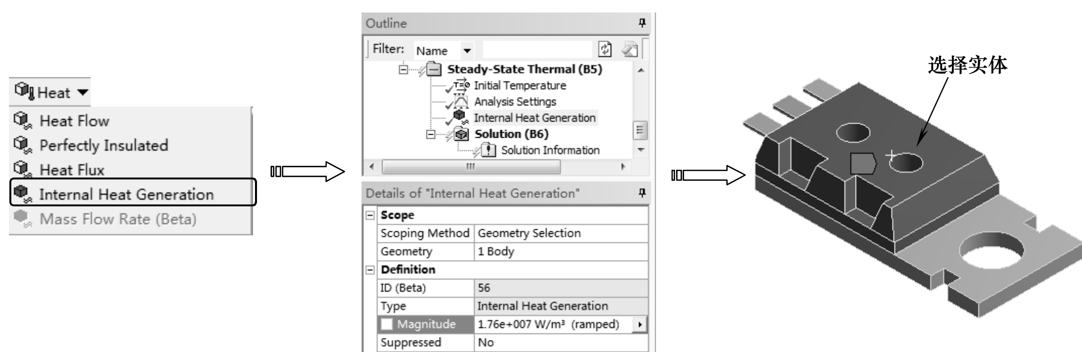


图 11-39 设置内部热生成

2）单击【Environment】工具栏上的【Convection（对流）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，选择芯片除了接触热阻表面之外的所有表面，在【Details of "Convection"】列表中单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Film Coefficient】中输入 250，如图 11-40 所示。

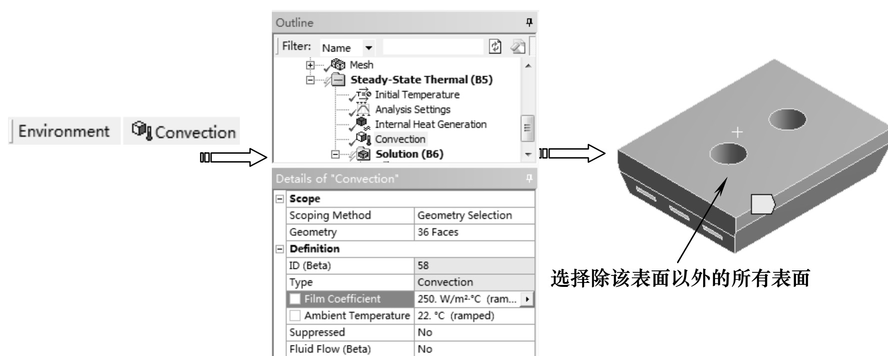


图 11-40 施加对流条件

3）单击【Environment】工具栏上的【Convection（对流）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，选择散热器除了接触热阻表面之外的所有表面，在【Details of "Convection 2"】列表中单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Film Coefficient】中输入 100，如图 11-41 所示。

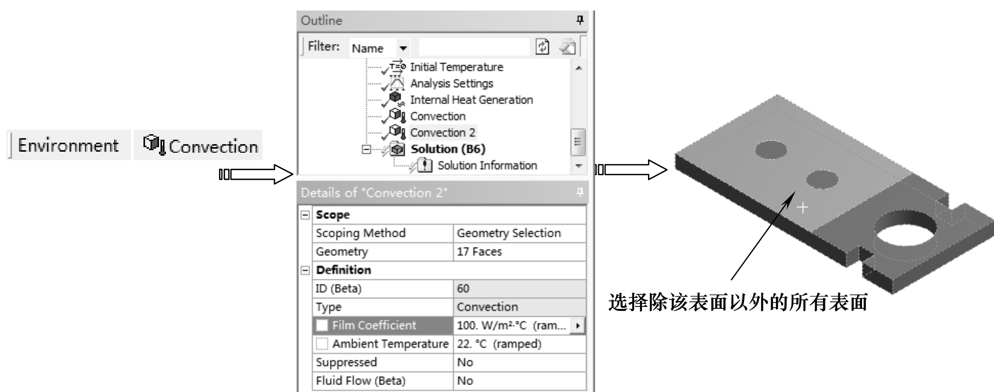


图 11-41　施加对流条件

提示：选择时，可在分析树的【Geometry】节点下的各实体中单击右键，在弹出的快捷菜单中选择【Show Body】或【Hide Body】命令显示隐藏实体。

8．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解温度。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature】求解项，如图 11-42 所示。

3）求解热通量。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Total Heat Flux】命令，此时在分析树中插入【Total Heat Flux】求解项，如图 11-43 所示。

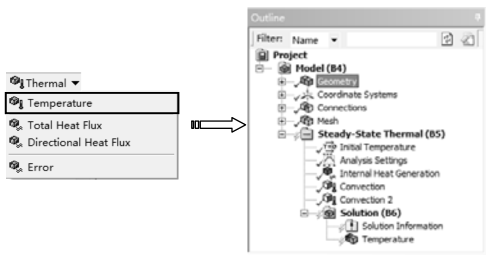


图 11-42　添加温度求解项

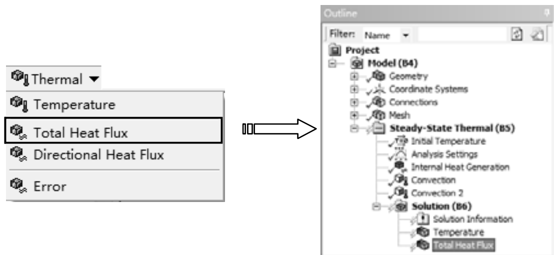


图 11-43　添加热通量求解项

9．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 11-44 所示。

2）温度分析云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Temperature】项 Temperature，在图形窗口显示出温度分析云图，如图 11-45 所示。

3）热通量云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Heat Flux】项 Total Heat Flux，在图形窗口显示出热通量云图，如图 11-46 所示。从图中可知芯片底部发生了最大的热流动。

4）创建坐标系。在【Outline（分析树）】中选择【Coordinate System】节点，单击【Coordinate Systems】工具栏上的【Create Coordinate System】按钮 ，在分析树中自动插入【Coordinate System】节点，在详细设置窗口中定义【Origin】下的【Define By】为

Global Coordinates，设置【Principal Axis】下的【Axis】为 Z，如图 11-47 所示。

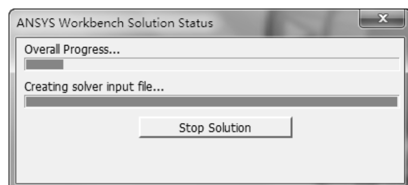


图 11-44　求解进度条

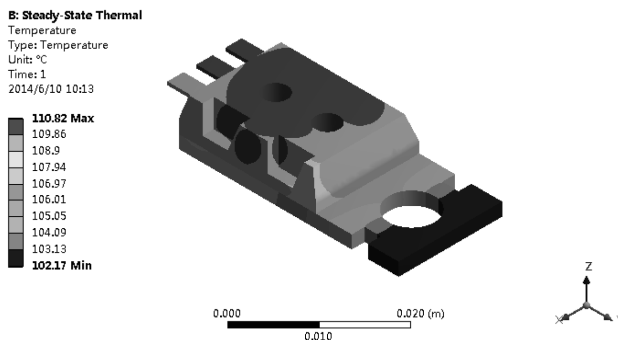


图 11-45　温度分析云图

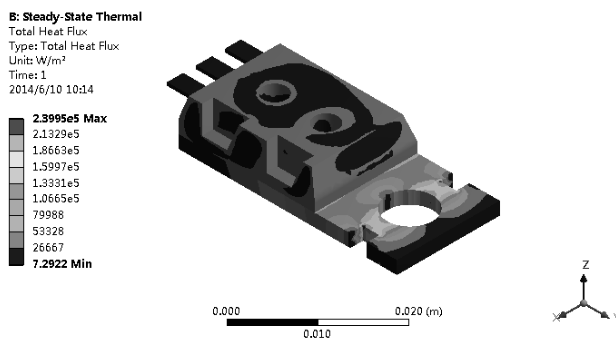


图 11-46　热通量云图

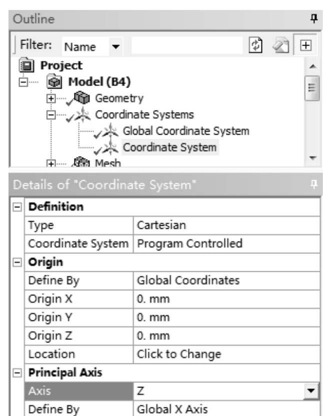


图 11-47　定义坐标系

5）创建表面。在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点，单击【Model】工具栏上的【Construction Geometry】按钮，然后单击【Construction Geometry】工具栏上的【Path】按钮 Surface ，在【Details of “Surface”】列表中的【Coordinate System】下选择新创建的 Coordinate System，如图 11-48 所示。

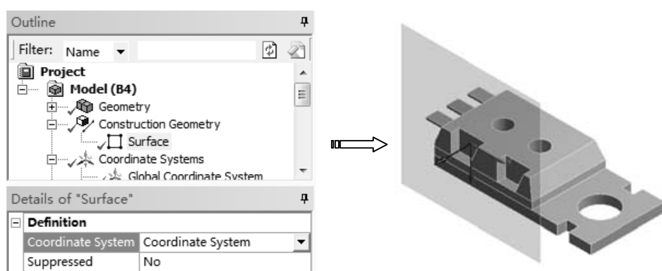


图 11-48　创建表面

6）映射表面。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature 2】，在详细设置窗口中选择【Scoping Method】为 Surface，选择【Surface】为 Surface，如图 11-49 所示。

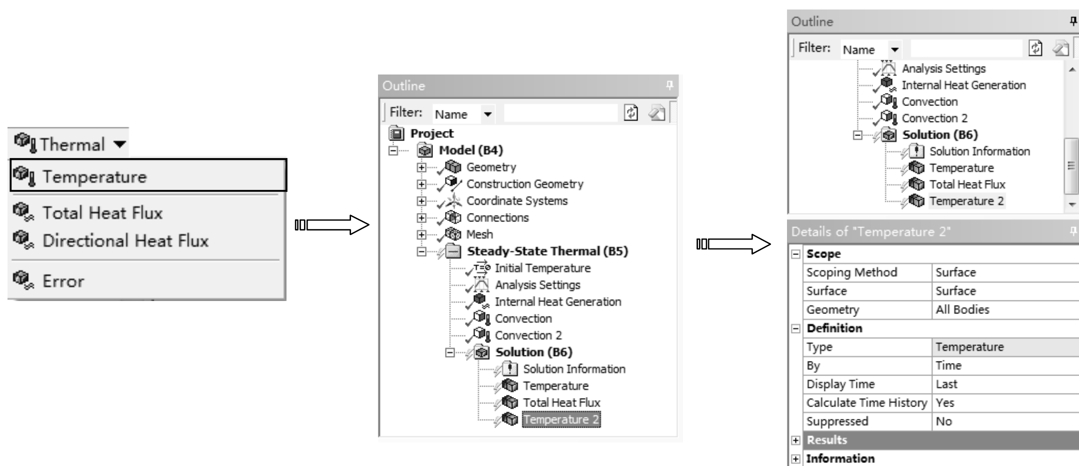


图 11-49　映射温度到表面

7）显示表面结果。在【Outline（分析树）】中选择【Surface Equivalent Stress】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，在图形窗口显示表面上的温度分布，如图 11-50 所示。

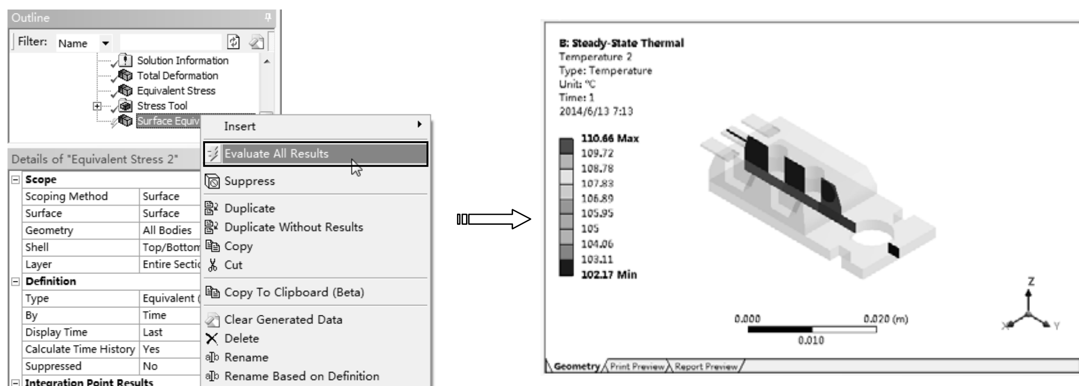


图 11-50　显示表面上的温度

10．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

11.2.4 实例总结

本节以芯片散热为例讲解了 ANSYS Workbench 的稳态热分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意以下几点：

1）ANSYS Workbench 稳态热分析的操作步骤是：启动 Workbench→建立分析项目→建立几何模型→建立接触热阻→划分网格→施加载荷和边界条件→设置求解项→求解→结果后处理等。

2）在定义接触热阻时，可选择【Outline（分析树）】中的【Connections】|【Contacts】下的【Contact Region 4】节点，在详细设置窗口中设置【Thermal Conductance Value】数值。

11.3 实例 2——芯片瞬态传热分析

11.3.1 实例说明

如图 11-51 所示芯片散热结构，包括一个黄铜散热器、一个陶瓷芯片和 3 个黄铜终端。陶瓷芯片产生热量的曲线如图 11-51 所示，通过自身和黄铜散热器的所有表面以对流方式向环境散发热量，3 个终端是隔热的，试求其瞬态温度场。

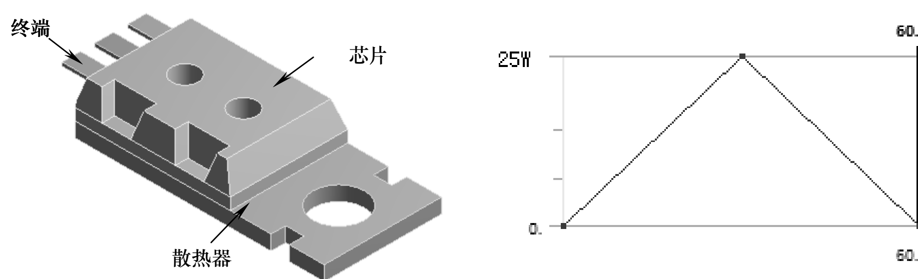


图 11-51 芯片结构及其产生热量的曲线

11.3.2 分析思路

本例中芯片热量随时间按线性规律变化，需要用瞬态热力学进行求解，设置时间为 60s，步长为 5s，在内部热生成载荷计算时，通过 Tabular Data 数据方式输入，通过温度探测得到芯片上所需点温度与时间变化曲线。

11.3.3　具体分析过程

1．打开分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【File】|【Open】命令，弹出【打开文件】对话框，选择上一个实例分析文件 chip.wbpj，如图 11-52 所示。

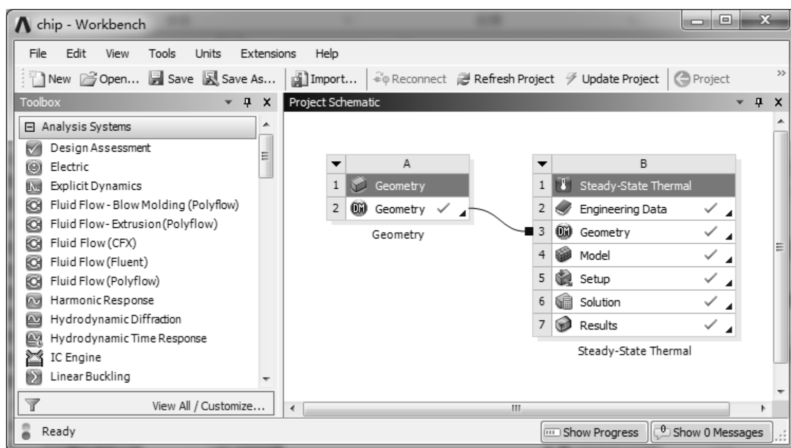


图 11-52　打开分析项目

2．启动瞬态热分析

在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Transient Thermal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 栏的【Solution】项上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 11-53 所示。

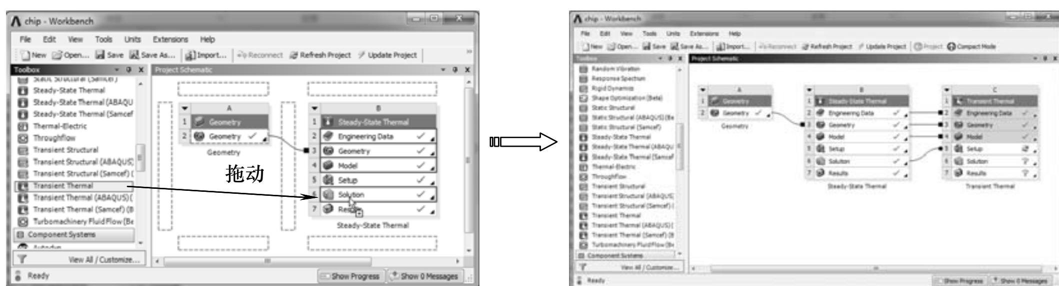


图 11-53　创建分析项目 C

3．分析设置

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C5 栏的【Setup】项，进入 Mechanical 界面。在分析树中出现【Transient Thermal（C5）】节点，如图 11-54 所示。

2）在【Transient Thermal（C5）】下选择【Analysis Setting】节点，在详细设置窗口中设置【Step End Time（分析结束时间）】为 60s，【Auto Time Stepping】为 Off，【Time Step（时间步长）】为 5s，如图 11-55 所示。

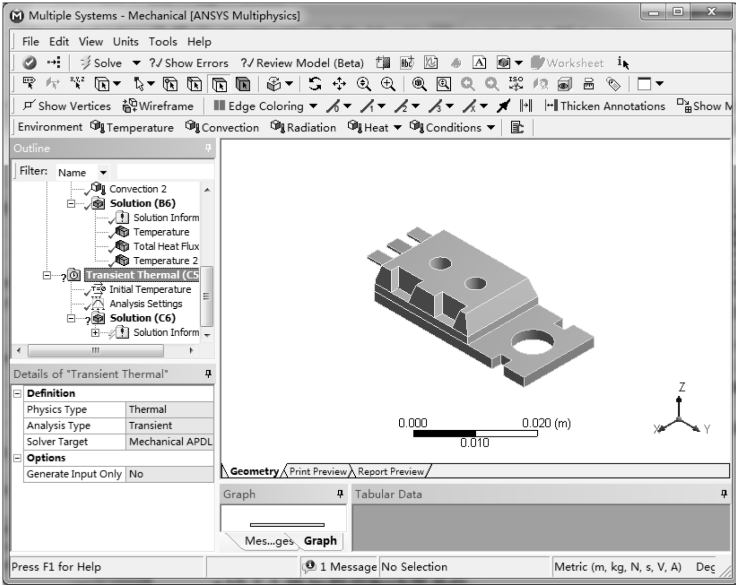


图 11-54　Mechanical 界面

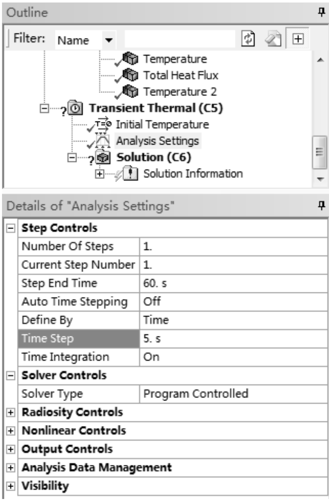


图 11-55　分析设置

4．施加载荷和边界条件

1）在【Steady-State Thermal（B5）】下选择【Convection】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Copy】命令，然后选中【Transient Thermal（C5）】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Paste】命令，复制 Convection 边界条件，如图 11-56 所示。

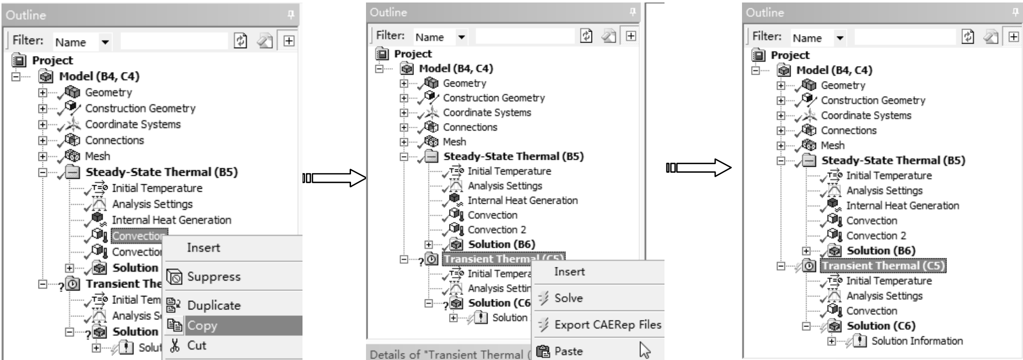


图 11-56　复制 Convection 边界条件

2）在【Steady-State Thermal（B5）】节点下选择【Convection 2】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Copy】命令，然后选中【Transient Thermal（C5）】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Paste】命令，复制 Convection 2 边界条件，如图 11-57 所示。

3）在【Steady-State Thermal（B5）】下选择【Internal Heat Generation】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Copy】命令，然后选中【Transient Thermal（C5）】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Paste】命令，复制 Internal Heat Generation 载荷，如图 11-58 所示。

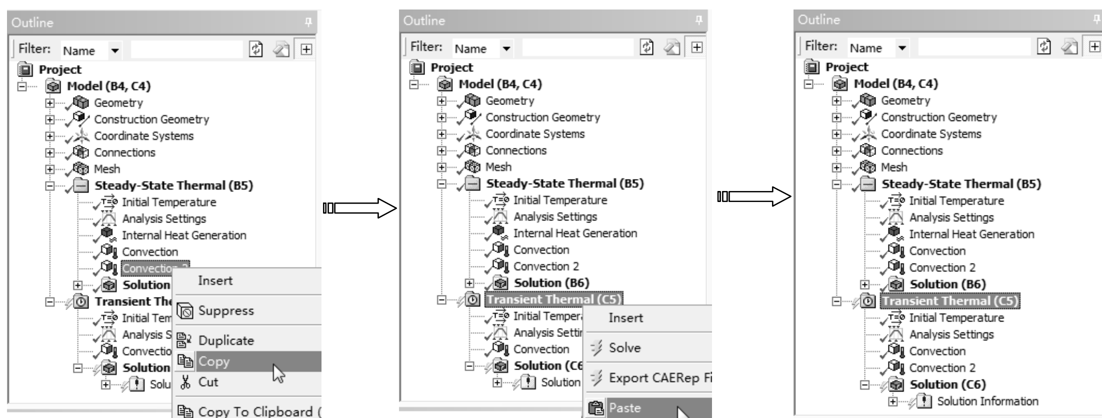


图 11-57　复制 Convection 2 边界条件

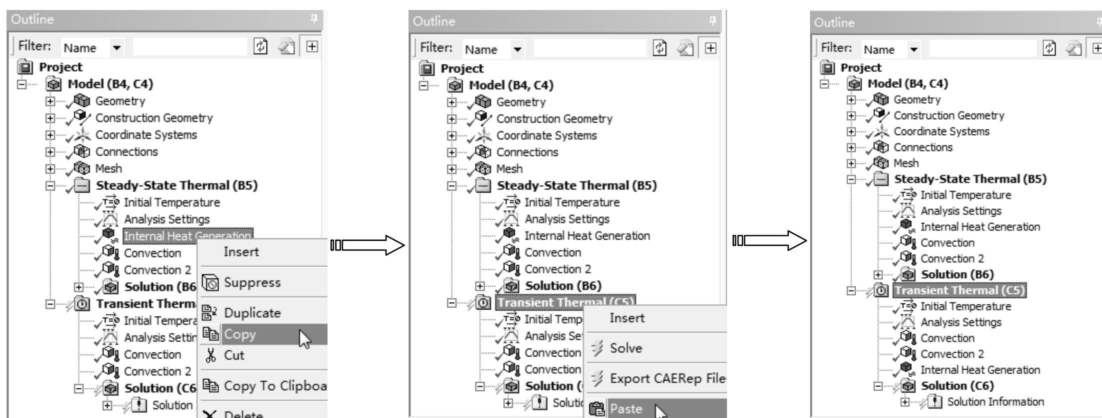


图 11-58　复制 Internal Heat Generation 载荷

4）在【Transient Thermal（C5）】下选择【Internal Heat Generation】节点，在【Tabular Data】窗口修改 Internal Heat Generation 载荷，如图 11-59 所示。

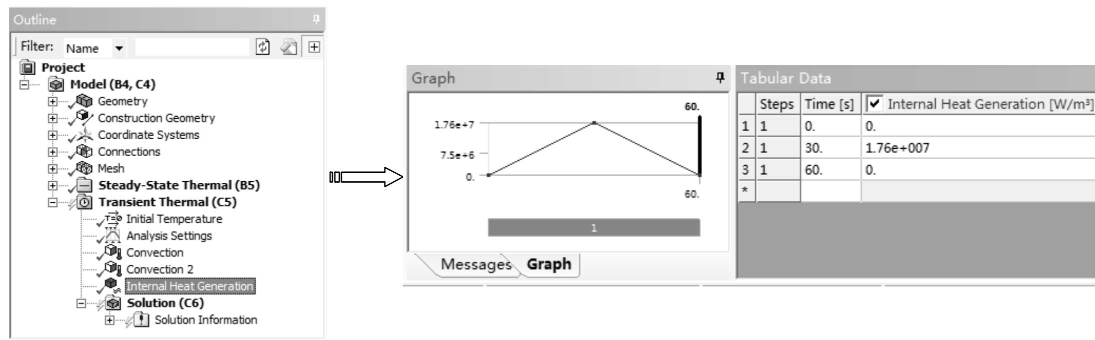


图 11-59　设置热生成参数

5．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。

求解完成后进度条自动消失，如图 11-60 所示。

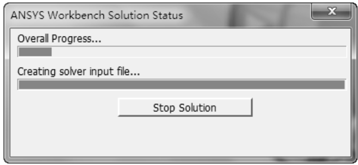


图 11-60　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。选择【Solution】工具栏上的【Probe】|【Temperature（温度）】命令，单击【Geometry】选项中的【Apply】按钮完成，如图 11-61 所示。

3）在分析树中选择【Temperature Probe】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，将显示出节点温度变化曲线，如图 11-62 所示。

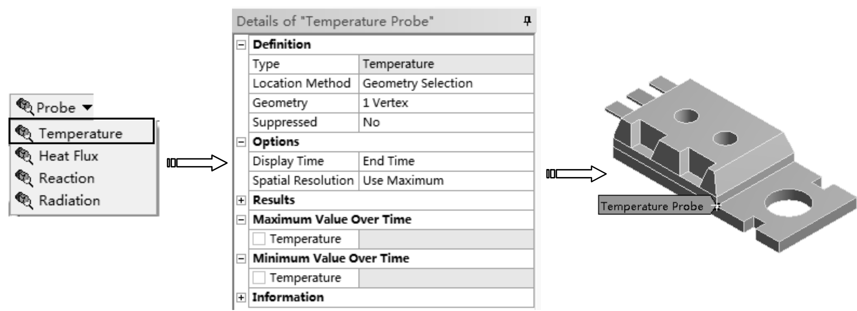


图 11-61　插入温度探测

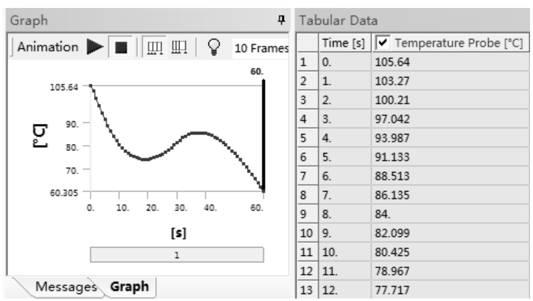


图 11-62　节点温度变化曲线

4）求解温度。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature】求解项。右击插入的【Temperature】求解项，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，如图 11-63 所示。

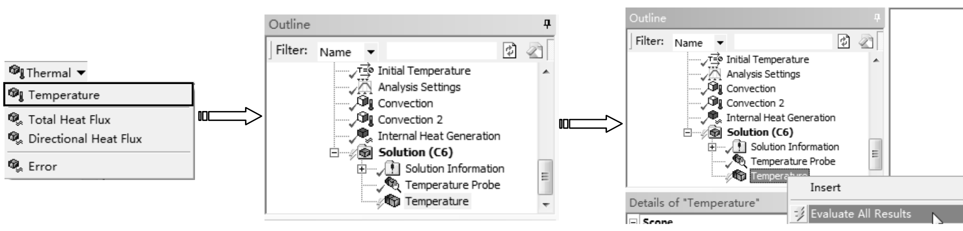


图 11-63　添加温度求解项

5）选中【Solution（C6）】节点下的【Temperature】选项，在【Graph】对话框中单击▶按钮，图形区显示温度变化过程，如图 11-64 所示。

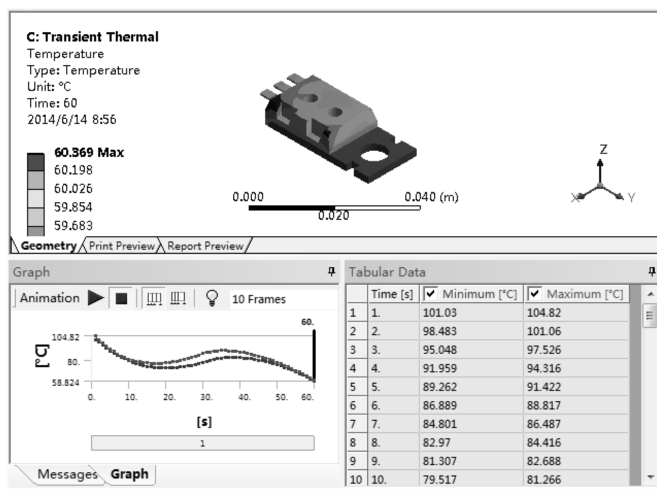


图 11-64　显示温度变化图

6．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

11.3.4　实例总结

本节以芯片散热为例讲解了 ANSYS Workbench 的瞬态热分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：在瞬态热分析中需要设置 Step End Time（定义瞬态分析的结束时间）和 Time Step（控制时间步长）。

11.4　实例 3——齿轮淬火瞬态热分析

11.4.1　实例说明

如图 11-65 所示齿轮的温度为 900℃，放置到 20℃方形水槽中冷却，水槽外为空气，计算 120s 后齿轮和水的温度场分布。齿轮材料为结构钢，水的密度为 1000kg/m^3，比热为 4185J/（kg・C），热导率为 0.61W/（m・C）。



图 11-65　齿轮结构

11.4.2　分析思路

忽略水的流动，齿轮置于水槽中央，属于瞬态热分析问题。先做稳态热分析，以获得瞬态热分析的初始条件，然后将其传递到瞬态热分析之中；在瞬态热分析中设置水槽周边面的对流换热，来求解随时间变化的温度场。

11.4.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 11-66 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 11-67 所示。

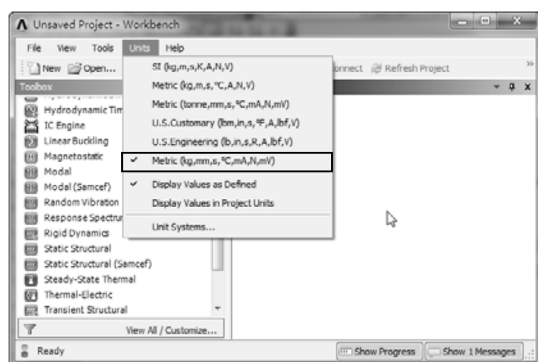


图 11-66　设置分析单位



图 11-67　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Steady-State Thermal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 11-68 所示。

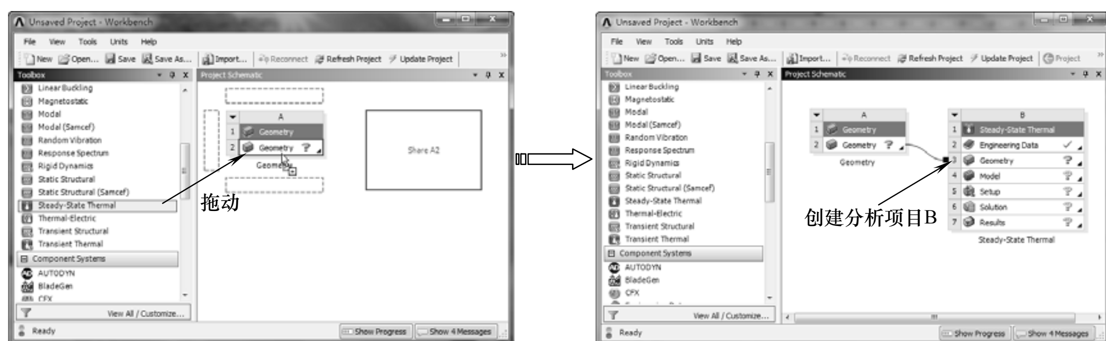


图 11-68　创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Transient Thermal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 栏的【Solution】项上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 11-69 所示。

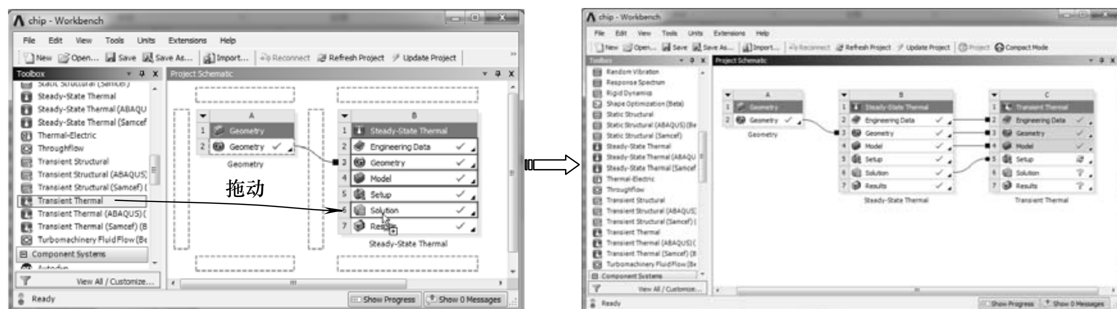


图 11-69　创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 11-70 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter11\11.4\uncompleted\gear.x_t”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 11-71 所示。

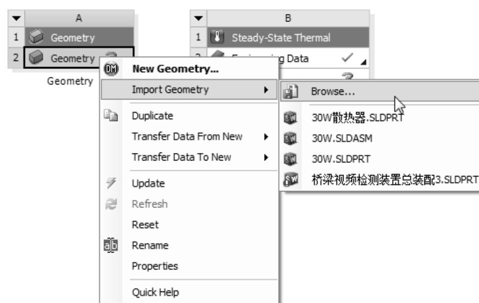


图 11-70　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

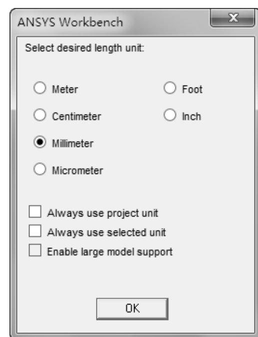


图 11-71　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 ⚡Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 11-72 所示。

5）选择【Tools】|【Enclosurel】命令，选择所有实体作为包围实体，单击详细列表窗口中的【Apply】按钮，然后单击【Generate】按钮，生成包围实体，如图 11-73 所示。

6）单击💾按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（gear.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

7）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

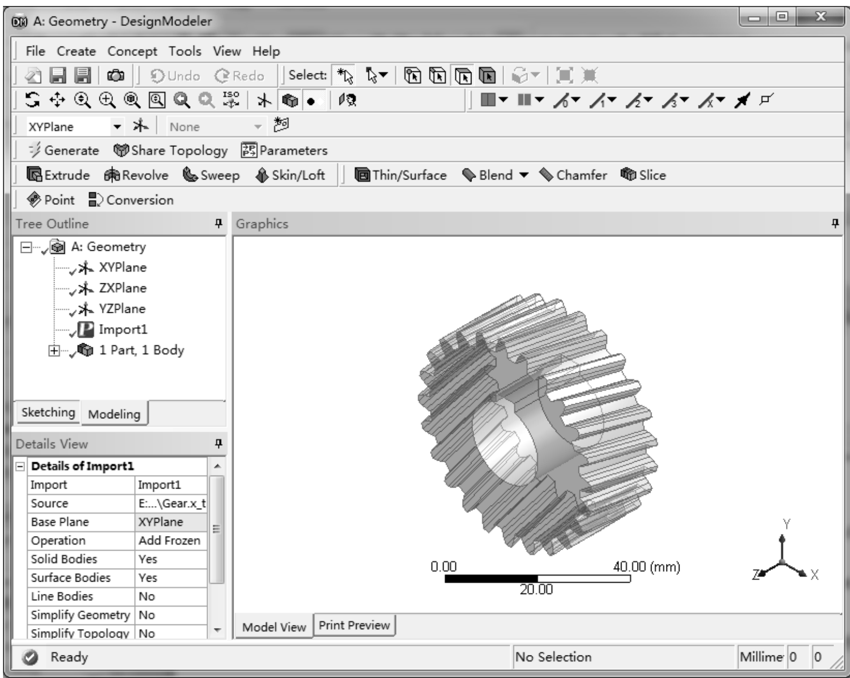


图 11-72　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

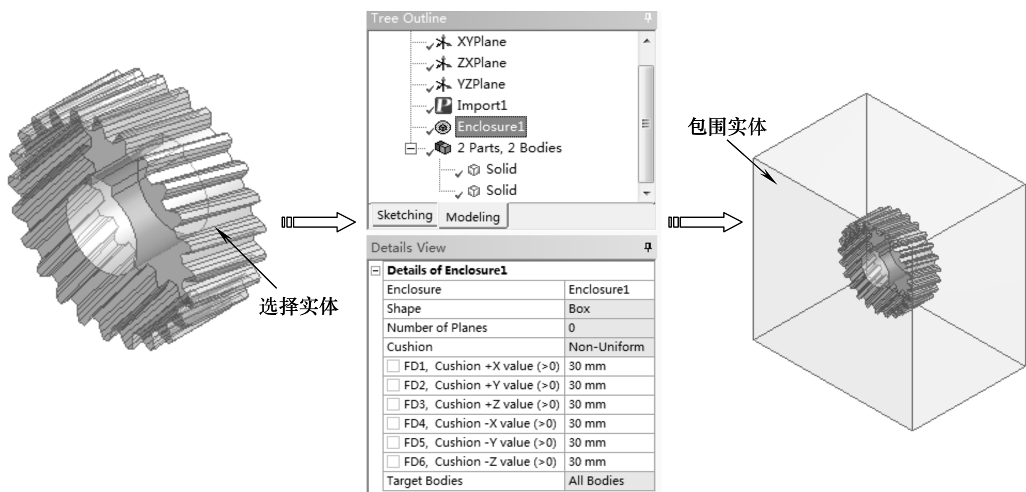


图 11-73　创建包围

3．添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入图 11-74 所示的材料参数设置界面。

2）在【Outline of Schematic B2】窗口中单击【Click here to add a new material】选项，在空白处输入材料名称 water，如图 11-75 所示。

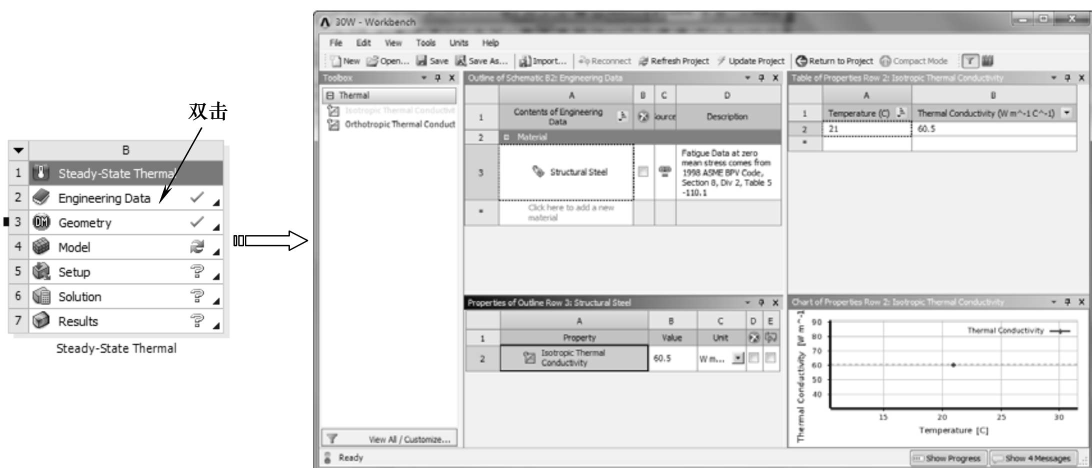


图 11-74　双击【Engineering Data】选项

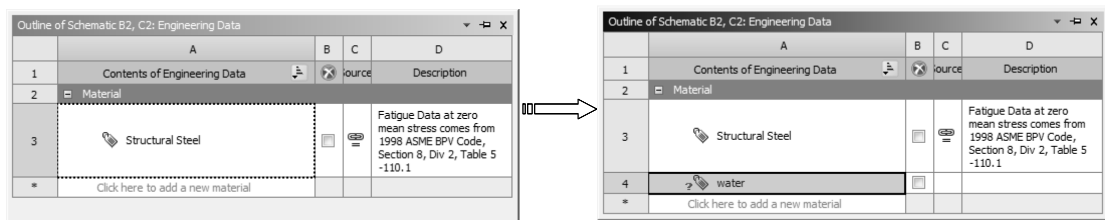


图 11-75　输入材料名称

3）在【Outline of Schematic B2】窗口中选中新建的材料 water，出现【Properties of Outline Row 4：water】窗口，在【Toolbox（工具箱）】中【Physical Properties】下的【Density】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，释放鼠标创建密度属性并输入属性值，如图 11-76 所示。

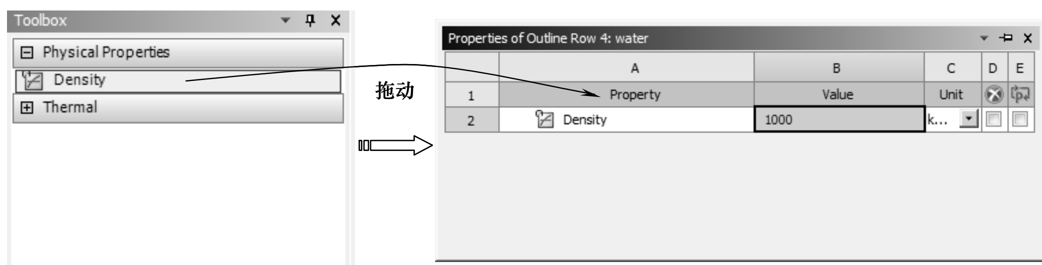


图 11-76　创建密度属性

4）同理，在【Toolbox（工具箱）】中【Thermal】下的【Isotropic Thermal Conductivity】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，释放鼠标创建热导率属性并输入属性值 0.61，如图 11-77 所示。

5）同理，在【Toolbox（工具箱）】中【Thermal】下的【Specific Heat】选项上按住鼠标左键，拖动到 A1 栏的【Property】选项上，释放鼠标创建比热属性并输入属性值 4185，如图 11-78 所示。

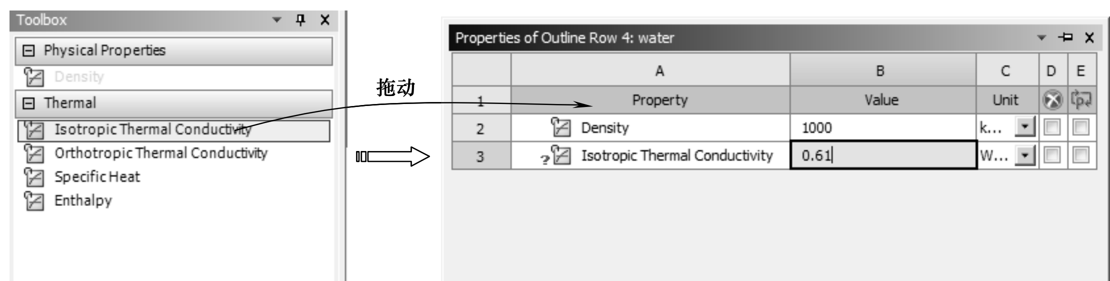


图 11-77　添加热导率属性

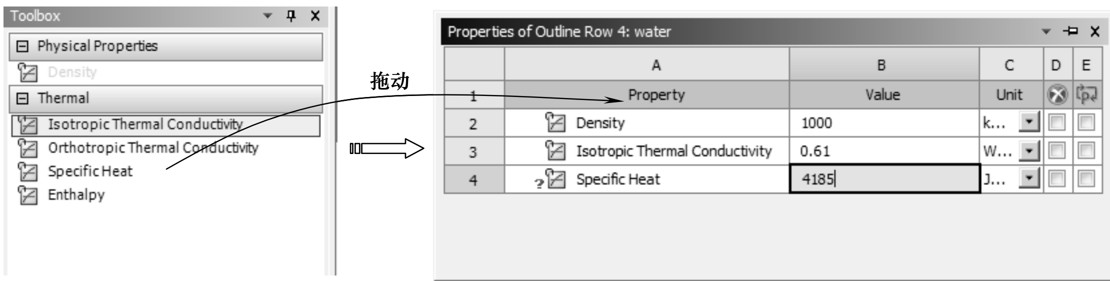


图 11-78　添加比热属性

6）单击【Return to Project】按钮 Return to Project ，返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 11-79 所示。

2）选择【Units】|【Metric（mm,kg,N,s,mV,mA）】命令，设置分析单位，如图 11-80 所示。

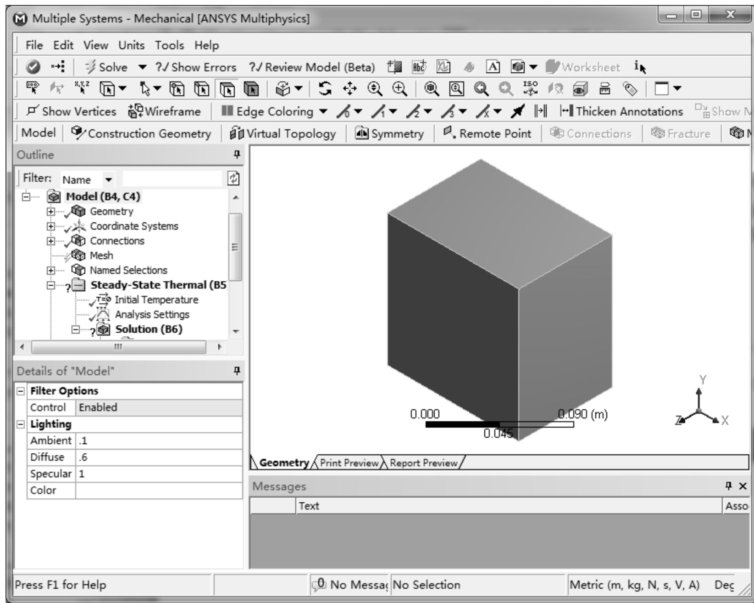


图 11-79　Mechanical 用户界面

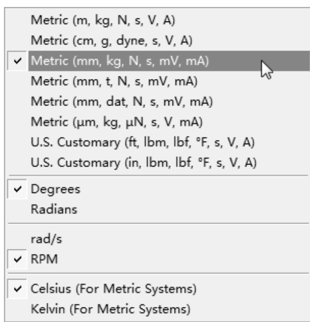


图 11-80　设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选择【Geometry】节点下的第一个 Solid，此时在详细设置窗口中单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击▸按钮，选择 Structural Steel，将材料设置为结构钢，如图 11-81 所示。

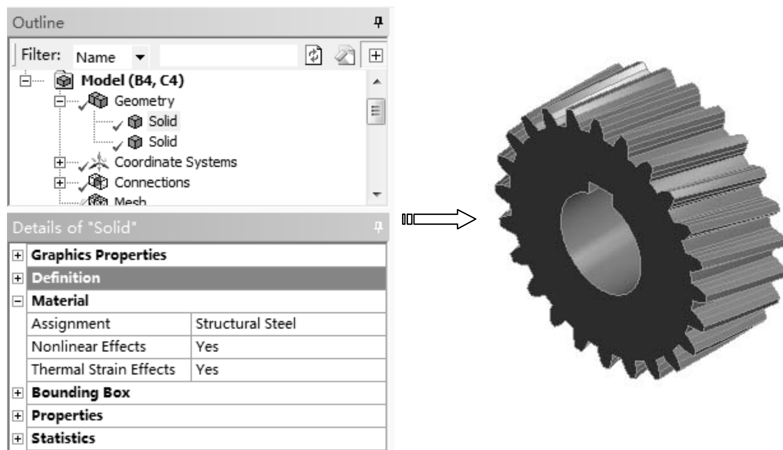


图 11-81　设置齿轮材料

4）在窗口左侧【Outline（分析树）】中单击【Geometry】节点下的第二个 Solid，此时在详细设置窗口中单击【Material】节点下的【Assignment】选项，然后单击▸按钮，选择 water，将材料设置为水，如图 11-82 所示。

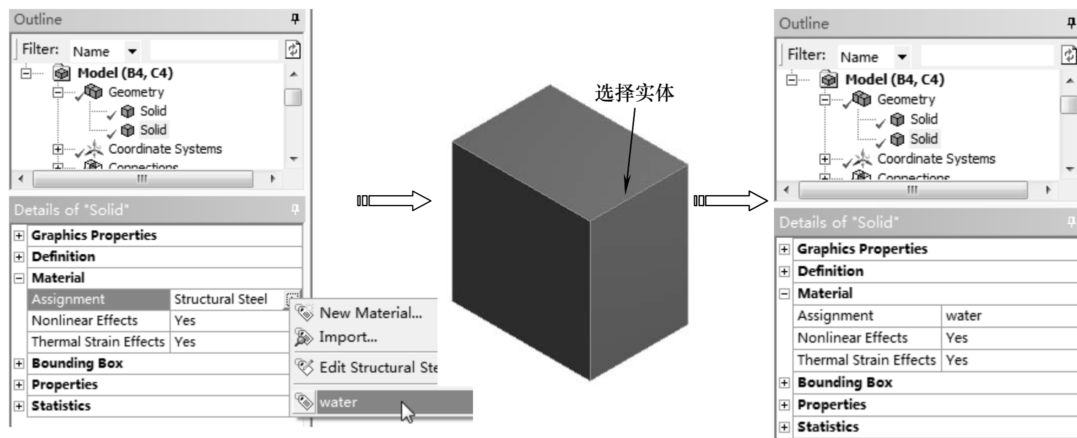


图 11-82　设置水材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击窗口上方图形选择工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 11-83 所示。

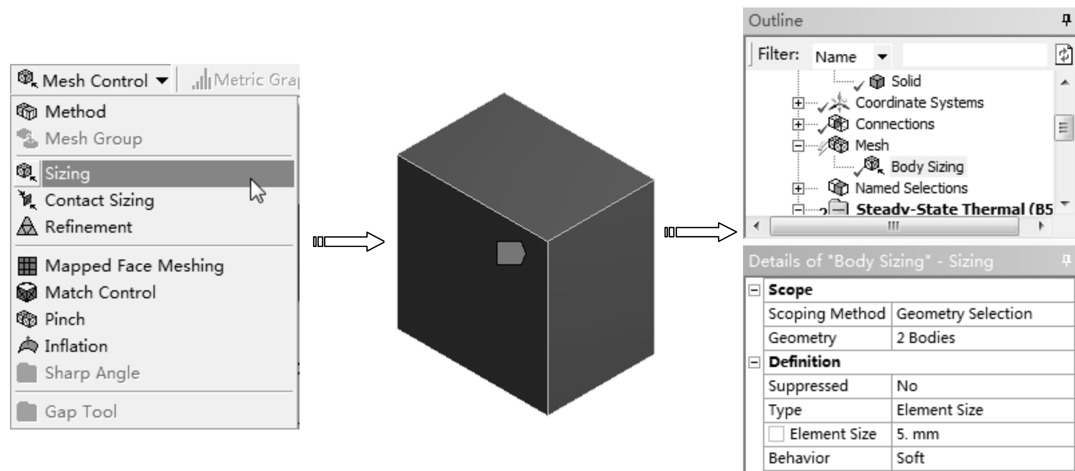


图 11-83　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 11-84 所示。

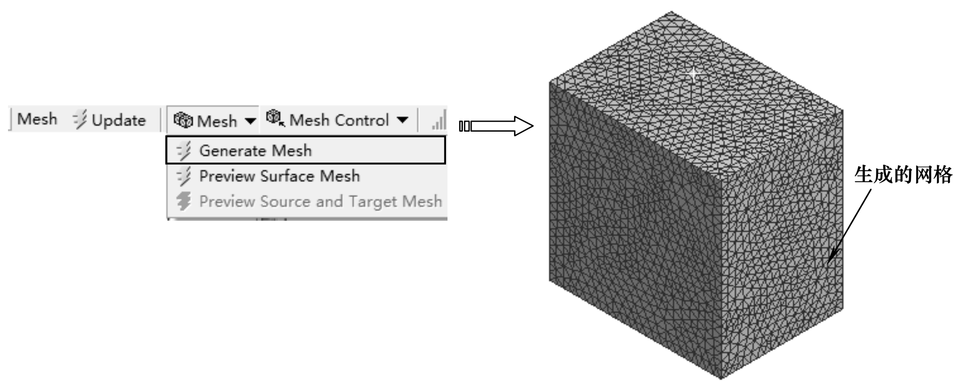


图 11-84　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Steady-State Thermal（B5）】节点，单击【Environment】工具栏上的【Temperature】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮 ，然后再单击【Body（选择体）】按钮 ，选择水实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在详细设置窗口中【Definition】选项下的【Magnitude】中输入 20，如图 11-85 所示。

2）单击【Environment】工具栏上的【Temperature】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮 ，然后再单击【Body（选择体）】按钮 ，选择齿轮实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在详细设置窗口中【Definition】选项下的【Magnitude】中输入 900，如图 11-86 所示。

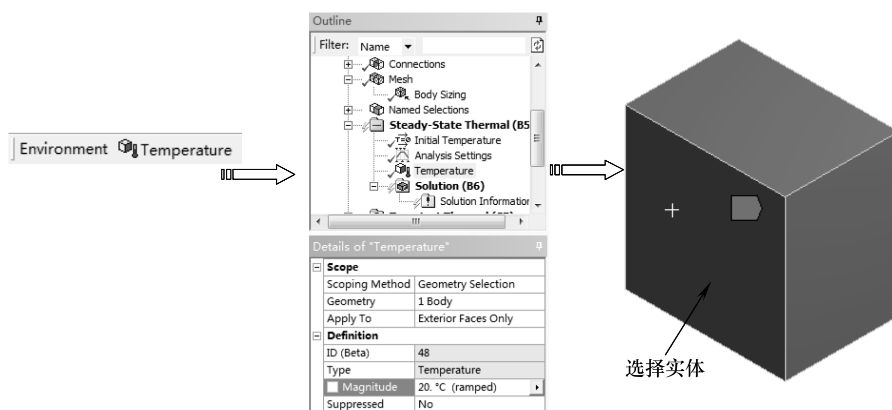


图 11-85　施加温度

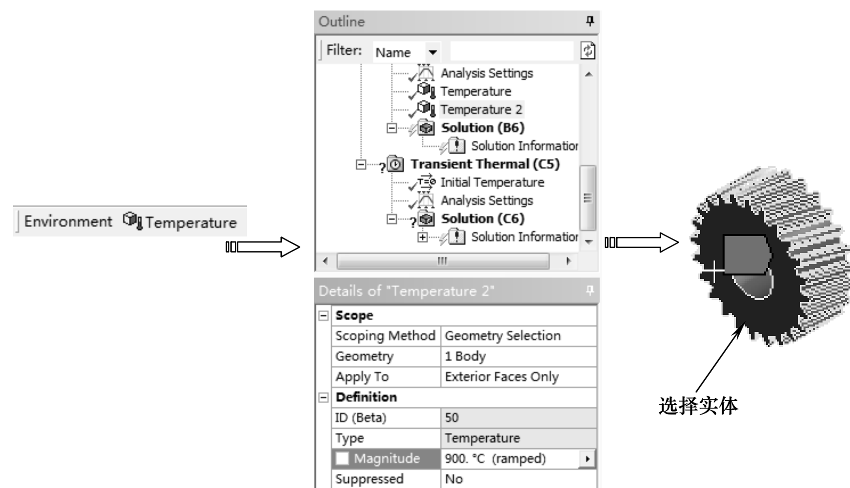


图 11-86　施加温度

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解温度。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature】求解项，如图 11-87 所示。

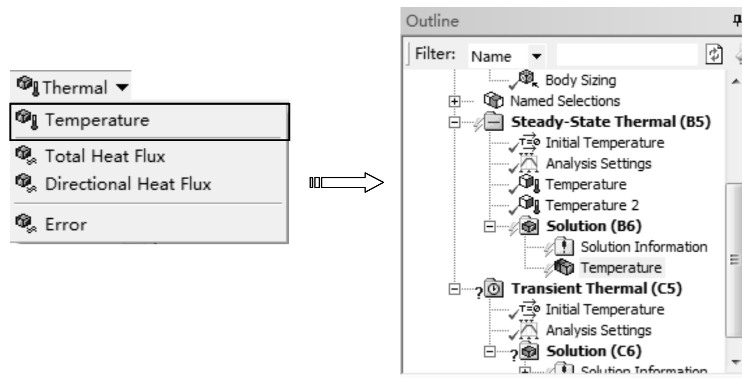


图 11-87　添加温度求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 11-88 所示。

2）温度分析云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Temperature】项 Temperature，在图形窗口显示出温度分析云图，如图 11-89 所示。

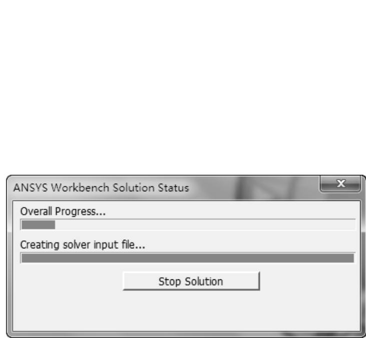


图 11-88　求解进度条

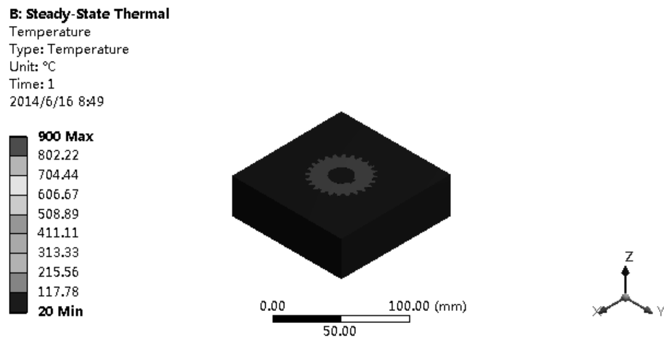


图 11-89　温度分析云图

9．瞬态热分析设置

在【Transient Thermal（C5）】下选择【Analysis Setting】节点，在详细设置窗口中设置【Step End Time（分析结束时间）】为 120s，【Auto Time Stepping】为 Off，【Time Step（时间步长）】为 5s，如图 11-90 所示。

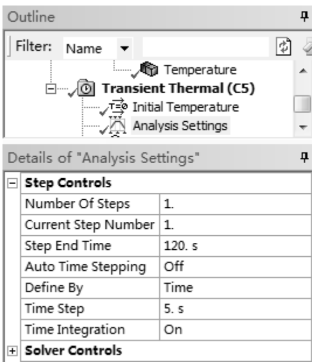


图 11-90　分析设置

10．施加载荷和边界条件

单击【Environment】工具栏上的【Convection（对流）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，选择水实体的 6 个外表面，在【Details of“Convection”】列表中单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Film Coefficient】中输入 5，如图 11-91 所示。

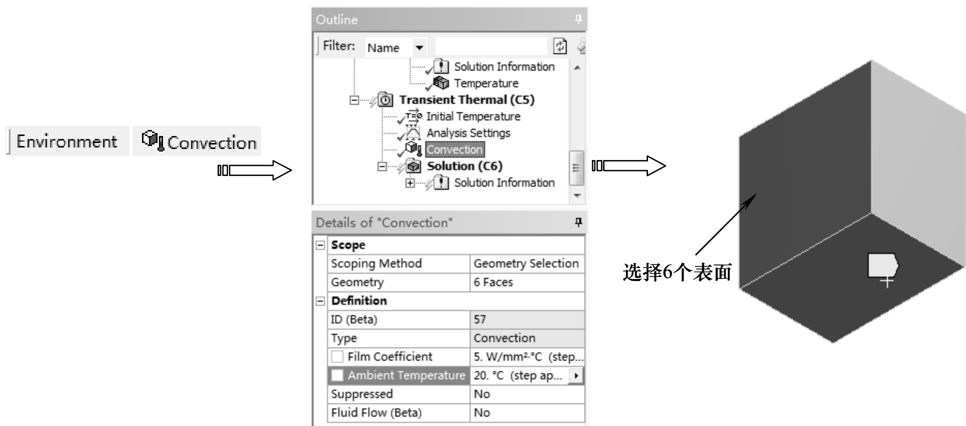


图 11-91　施加对流条件

11．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 11-92 所示。

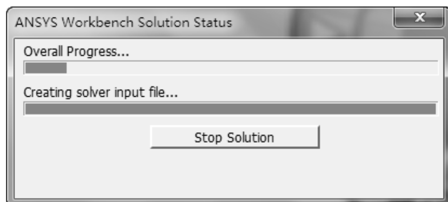


图 11-92　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。选择【Solution】工具栏上的【Probe】|【Temperature（温度）】命令，单击【Geometry】选项中的【Apply】按钮完成，如图 11-93 所示。

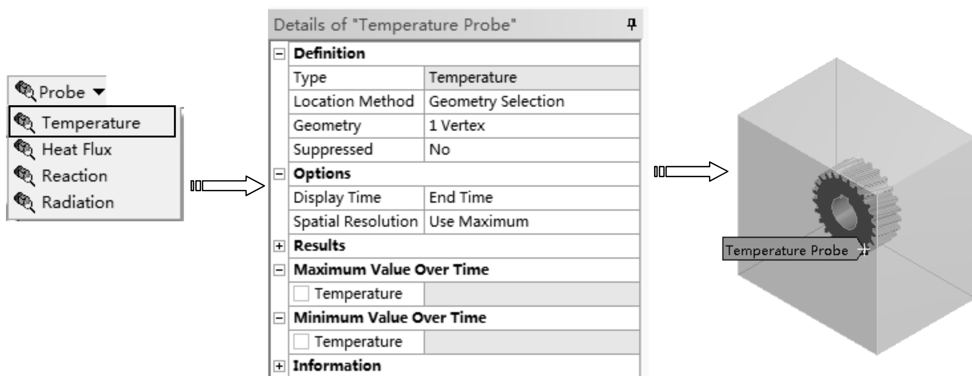


图 11-93　插入温度探测

3）在分析树中选择【Temperature Probe】节点，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，将显示出节点温度变化曲线，如图 11-94 所示。

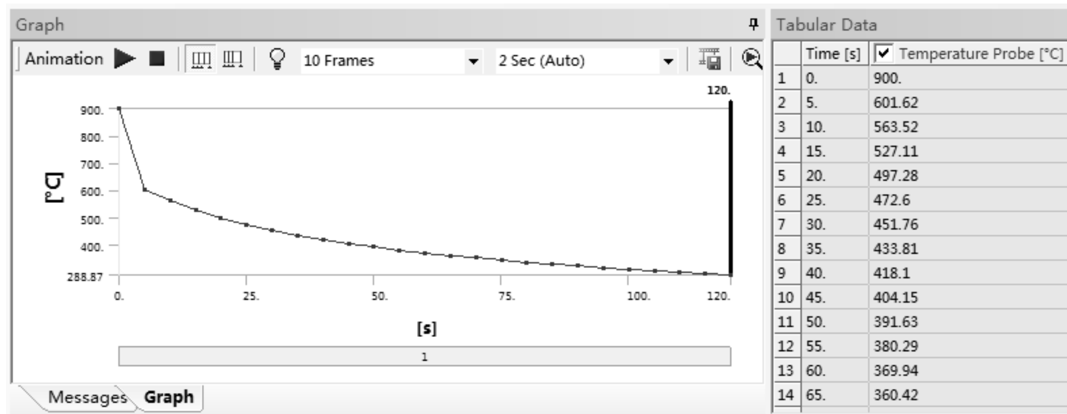


图 11-94　节点温度变化曲线

4）求解温度。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature】求解项。右击插入的【Temperature】求解项，在弹出的快捷菜单中选择【Evaluate All Results】命令，如图 11-95 所示。

5）选中【Solution（C6）】节点下的【Temperature】选项，在【Graph】对话框中单击▶按钮，图形区显示温度变化过程，如图 11-96 所示。

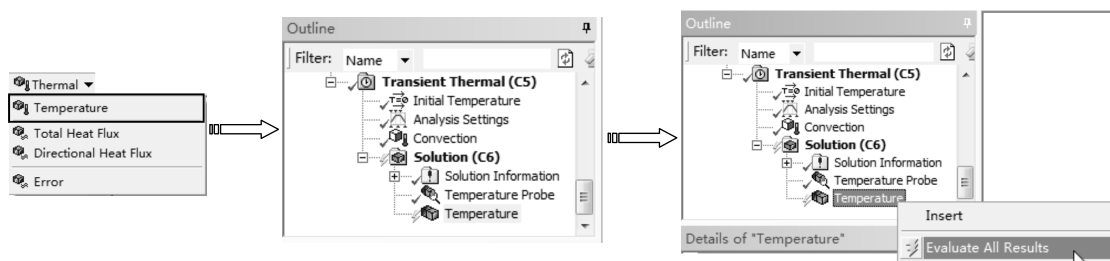
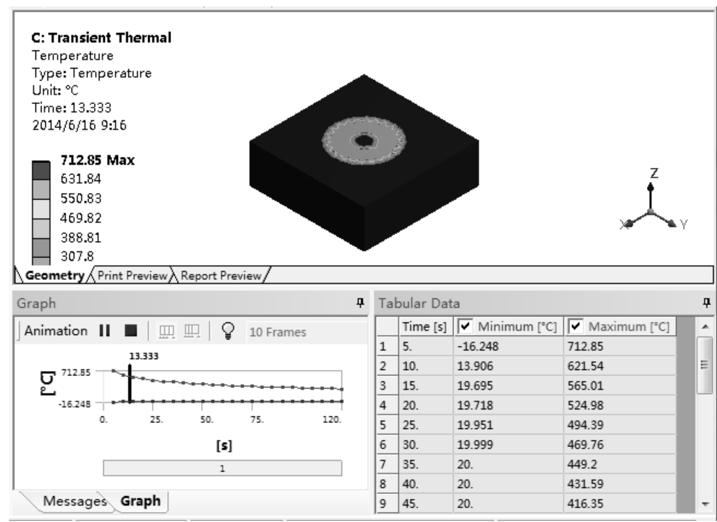


图 11-95　添加温度求解项



	Time [s]	Minimum [°C]	Maximum [°C]
1	5.	-16.248	712.85
2	10.	13.906	621.54
3	15.	19.695	565.01
4	20.	19.718	524.98
5	25.	19.951	494.39
6	30.	19.999	469.76
7	35.	20.	449.2
8	40.	20.	431.59
9	45.	20.	416.35

图 11-96　显示温度变化图

12．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

11.4.4　实例总结

本节以齿轮淬火为例讲解了 ANSYS Workbench 的稳态热和瞬态热分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：在进行瞬态热分析时，往往先进行稳态热分析以获得瞬态热分析所需的初始条件，然后通过建立瞬态热分析的分析设置和边界条件，进行多载荷步求解。

11.5　本章小结

本章讲解了 ANSYS Workbench 软件的热分析基础知识和典型案例，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。读者学习时，可以比较 ANSYS Workbench 的稳态热和瞬态热分析的异同处。

第 12 章　ANSYS 14.5 Workbench 结构优化分析实例

结构优化设计就是将实际工程设计问题转化为最优化问题，然后选择适当的最优化方法，从满足要求的可行设计方案中寻找实现预期目标的最优设计方案的一种求解方法。ANSYS Workbench 可利用 Design Exploration 实现产品的快速优化，本章将首先对 ANSYS Workbench 软件优化工具进行详细讲解，然后介绍相应的典型案例。

12.1　优化设计概述

最优化问题实际上是一种寻求最优设计方案的技术方法。优化设计就是将实际工程设计问题转化为最优化问题，然后选择适当的最优化方法，从满足要求的可行设计方案中寻找实现预期目标的最优设计方案的一种求解方法。

12.1.1　优化设计类型

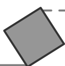
1．拓扑优化设计

拓扑优化设计主要用于产品概念设计阶段或对现有设计中的重量进行缩减的设计中。在产品概念（初期）设计阶段，如果是全新产品或较大程度的改型设计，在没有证明是最优结构的现有产品以供参考，或没有既有成功经验以供借鉴的基础上，是很难采取有效的手段来快捷、准确地确定产品初始构型的。

通过使用拓扑优化技术，对受载荷的零件体积优化给出预测。在 Workbench 中，执行拓扑优化是在线性静力结构分析的基础上进行的。拓扑优化主要用于单独的静力结构分析中，因此，拓扑优化就是在一定载荷作用下，寻找到对整体结构的强度不产生负面影响的可去除的面积，来实现减少结构质量或体积的基础上的最小化。

进行形状优化设计之前，必须像静力结构分析一样，先导入几何模型、设定材料属性、定义装配体接触、网格划分、定义载荷和约束、设定求解结果选项和设置形状优化设计的一些选项，然后进行求解并注意观察和分析求解结果，最后对结果进行重新建模等分析，检验其性能是否满足。对于形状优化设计，有以下几点需要注意：

1）几何和材料属性不同于线性静力分析，形状优化只适用于实体，对线或壳不能应用；对于材料的属性，杨氏模量和泊松比是必需的；当施加加速度以及其他惯性载荷时，密度是



必需的；如果施加热载荷，热膨胀系数和热传导率都是必需的。

2）对于装配体，必须定义接触对，对于零件就不需要定义接触选项。

3）网格的密度将影响求解的精度。细化网格使得计算比较耗时，但是材料可去除的面积将更清楚地被定义。

4）任何载荷和约束都可以用于形状优化设计模块。在定义载荷和约束的位置，材料一般要保持不变，否则结果将会发生显著变化。

5）对于形状优化，最主要的结果就是指定缩减的目标量（默认是 20%缩减量）。

6）大变形不适用于形状优化。

7）由于需要多重迭代，因此在同一个模型上的形状优化比单独的静力分析花费的时间要长。求解完成，Workbench 将用不同颜色区分可去除材料和保留材料，并将初始结构和最终结构的质量进行详细比较，供设计人员参考。当然，像其他分析一样，也可以采用动画播放来观看哪些材料可以去除和形状优化结果等。

2．结构参数优化

参数优化设计主要用于产品详细设计阶段。参数优化设计要求必须建立参数化的模型，参数可以是结构参数（比如尺寸等）、材料性能参数、载荷参数、受力点位置参数等；约束函数包括等式或不等式约束，主要限制参数范围、应力范围、应变范围等；目标函数常用的有重量、成本、最大应力、最大变形等。参数优化设计的基本原理同形状优化设计理论，也是在满足约束的条件下，运用优化算法，通过迭代反复计算，求得目标函数的极值，从而得到最优的参数进行结构设计。

优化策略的控制流程：首先从零件分析文件中读出零件的初始模型参数；在参数范围内修改参数大小；然后求解修改后的模型；读出修改后模型的结果，比如重量、应力等；判断是否满足收敛条件，若不满足，则修改参数重新计算，若满足，则退出循环；最后存储求解结果后退出，并查看最优的参数，修改结构，再进行分析检测。

参数化建模有两种方法：一种方法是在三维软件中直接建立参数化模型，导入 WorkBench 中参数是认可的，但在三维软件中的参数必须以 DS_开头；另一种方法是在 WorkBench 中直接建立模型，并设定参数即可。

12.1.2 Design Exploration 简介

Design Exploration（设计探索）是功能强大、方便易用的多目标优化和稳健性设计模块，可以帮助设计人员在产品开发阶段掌握不确定因素对产品性能的影响，进而最大限度地提高产品性能。

1．参数定义

在 Design Exploration 中，设计方案和产品性能最终都表示为参数。Design Exploration 的参数有 3 类：

（1）Input Parameters（输入参数） 由于仿真分析的所有输入参数都可以作为 Design Exploration 的输入参数，因此它可以从几何体、材料或载荷的尺寸及属性中设定。例如，可在 DesignModeler 中把几何体的长度、高度指定为输入参数，也可以在 Mechanical 中指定压力、力等载荷大小为输入参数。

（2）Output Parameters（输出参数） 通过 Workbench 计算得到的参数均可作为输出参数，典型的输出参数有质量、体积、频率、变形、应力、应变、热流密度、速度、临界屈曲载荷等。

（3）Derived Parameters（导出参数）导出参数是指不能直接得到的参数，它可以是输入参数和输出参数的组合值，也可以是由输入参数和输出参数经过数学运算得到的值。

2. Design Exploration 工具

Design Exploration 作为快速优化工具，实际上是通过设计点的参数来研究输出或导出参数的，由于设计点是有限的，因此也可通过优化的设计点拟合成响应曲面（线）来进行研究，如图 12-1 所示。

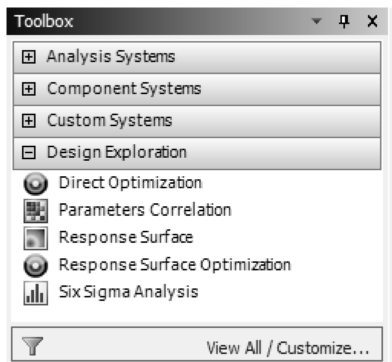


图 12-1　Design Exploration 优化工具

✧ Direction Optimization（直接优化）：设定优化目标，利用默认参数进行优化分析，从中得到期望的组合方案，也就是目标优化。
✧ Parameters Correlation（参数相关性优化）：用于得到输入参数的敏感性，也就是说可以得到某一输入参数对响应曲面的影响究竟是大还是小。
✧ Response Surface（响应曲面优化）：用于直观观察输入参数的影响，通过图表形式能够动态显示输入与输出参数之间的关系。
✧ Six Sigma Analysis（六西格玛优化）：用于评估产品的可靠性，其技术是基于 6 个标准误差理论，例如假设材料属性、几何尺寸、载荷等不确定性输入变量的概率分布对产品性能（应力、应变等）的影响。

12.2　实例 1——夹钳拓扑优化分析

12.2.1　实例说明

如图 12-2 所示夹钳，左端固定，左下面由压电陶瓷施加 1MPa 的驱动力，钳口产生位移，试拓扑优化其外形。

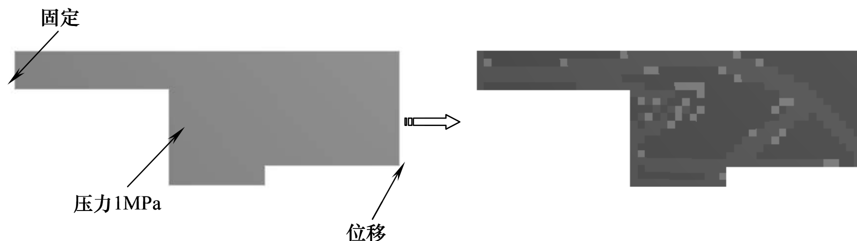


图 12-2　夹钳结构

12.2.2　分析思路

在结构拓扑优化时，ANSYS Workbench 提供了 Shape Optimization（Beta）工具。本例中

通过 SolidWorks 软件进行结构建模，然后导入到 Workbench 中，通过控制体积约束条件为 0.65 来计算优化后的结构形状。

12.2.3　具体分析过程

1．启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 12-3 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 12-4 所示。

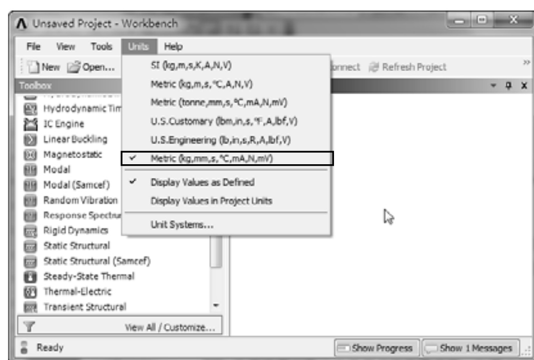


图 12-3　设置分析单位

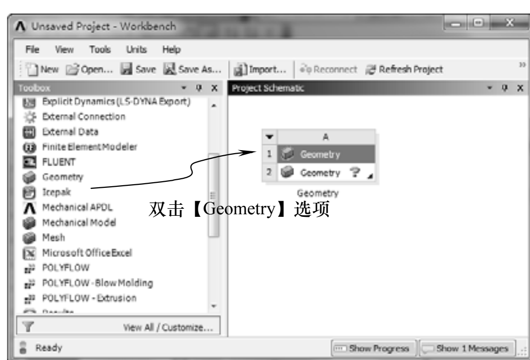
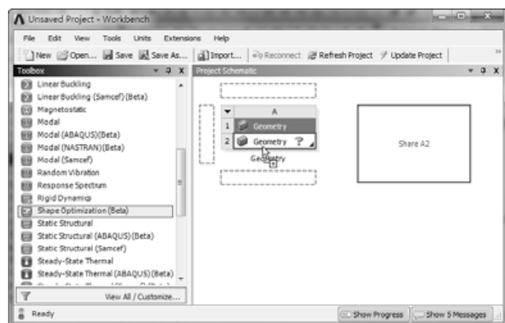


图 12-4　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Shape Optimization（Beta）】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 12-5 所示。



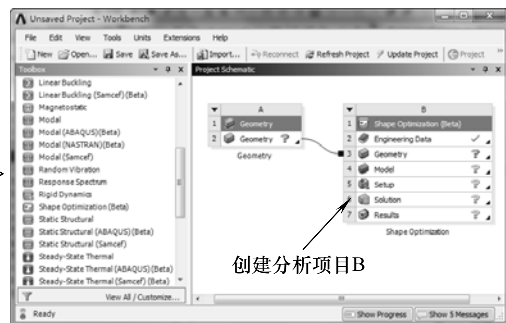


图 12-5　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 12-6 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter12\12.2\

uncompleted\jiaqian.sldprt”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 12-7 所示。



图 12-6　选择【Import Geometry】|【Browse】命令　　图 12-7　【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形，如图 12-8 所示。

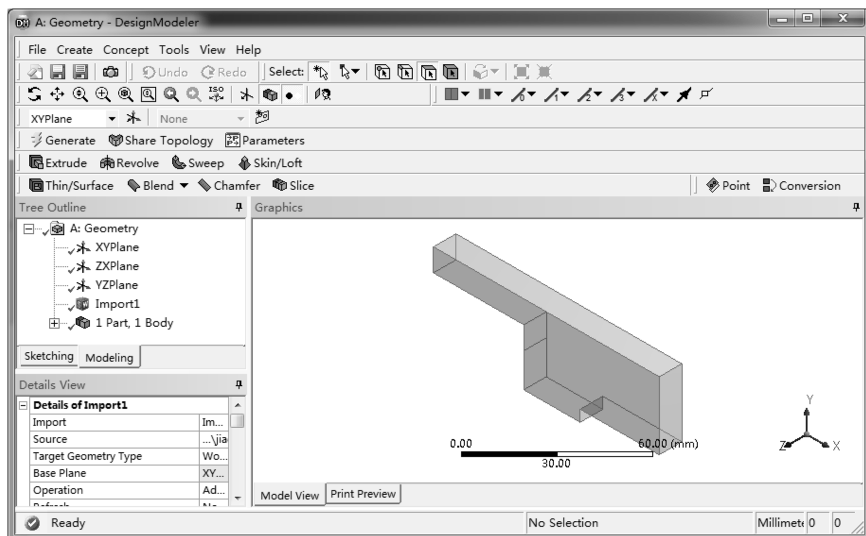


图 12-8　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）单击💾按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（chip.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

6）回到【DesignModeler】界面，单击右上角的 ✕ 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。单击窗口上方图形选择工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 12-9 所示。

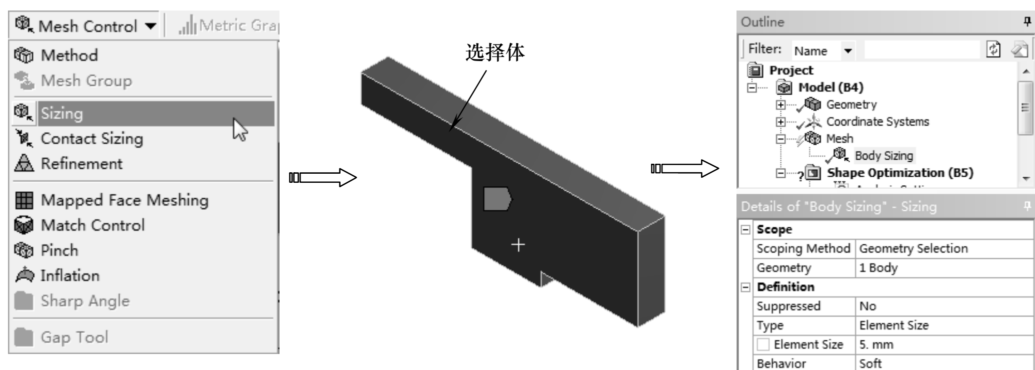


图 12-9　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 12-10 所示。

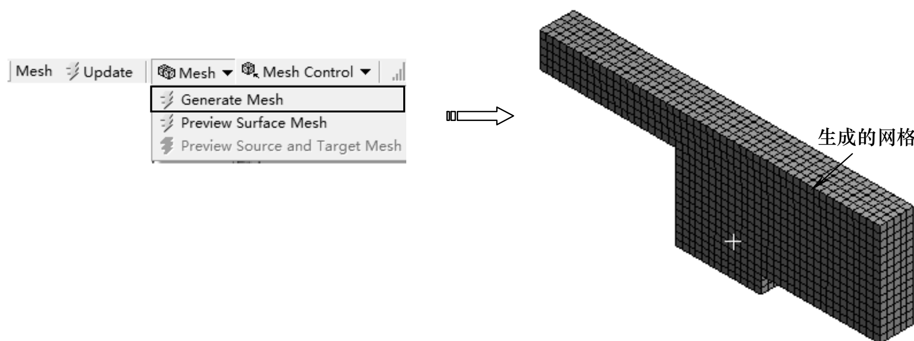


图 12-10　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Shape Optimization（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择左端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 12-11 所示。

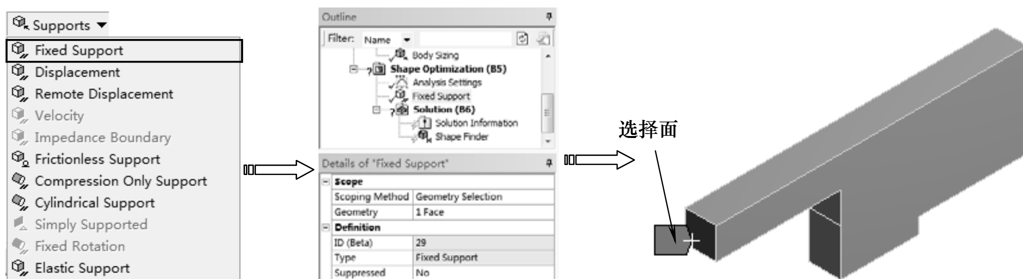


图 12-11　施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Frictionless Support】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Frictionless Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择下端面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 12-12 所示。

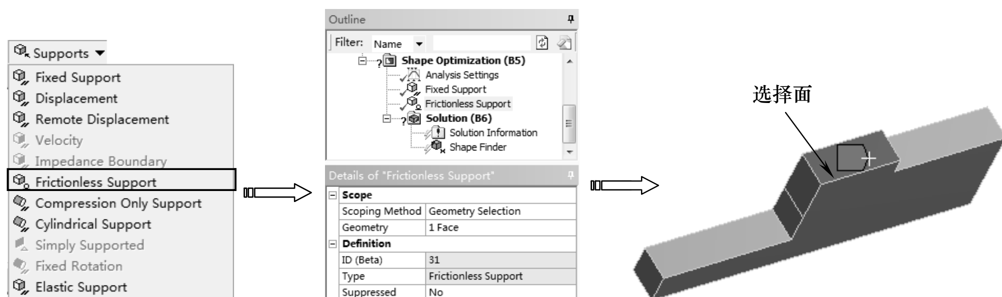


图 12-12　施加无摩擦约束

4）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Pressure】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of “Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择图 12-13 所示表面。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Magnitude】文本框中输入 1MPa，如图 12-13 所示。

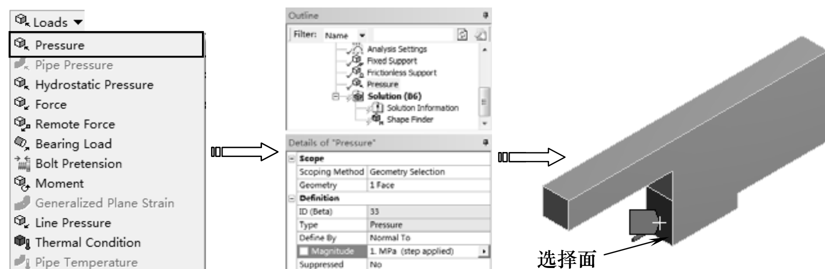


图 12-13　施加压力

5）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Displacement】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Edge（选择线）】按钮，在【Details of “ Displacement”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择图 12-14 所示的边线。单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Y Component】文本框中输入-0.002，如图 12-14 所示。

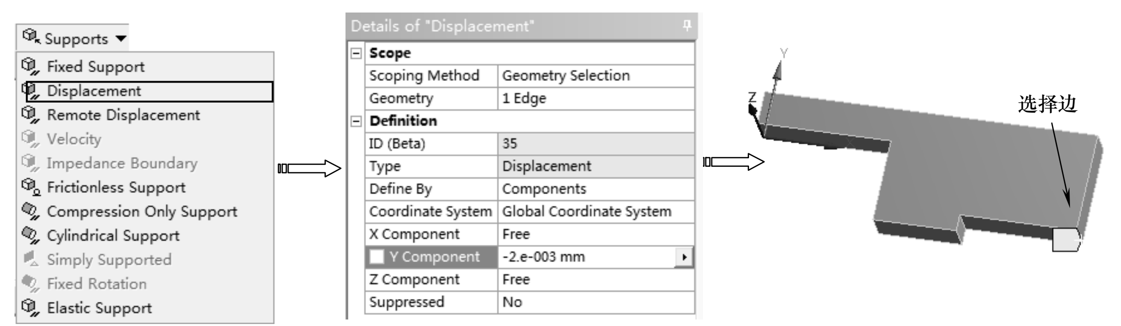


图 12-14　施加位移约束

7. 设置求解项

在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点下的【Shape Finder】项目，在详细设置窗口中设置【Target Reduction】为 65%，即拓扑优化目标为 65%材料体积，如图 12-15 所示。

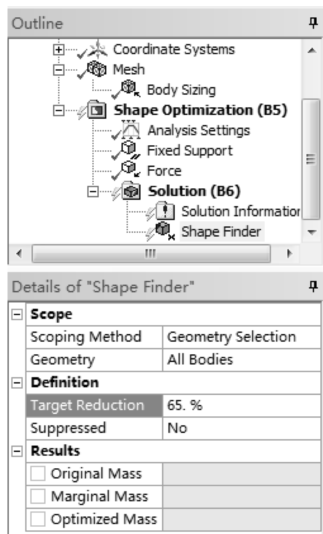


图 12-15　设置优化目标

8. 求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 12-16 所示。

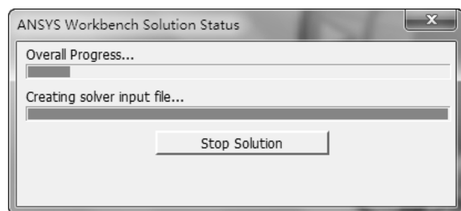


图 12-16　求解进度条

2）优化结果。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Shape Finder】项 Shape Finder，在图形窗口显示优化结果，灰色为保留区域，褐色为去除区域，如图 12-17 所示。读者可根据保留区域形状再次更改模型形状，此处不再叙述。

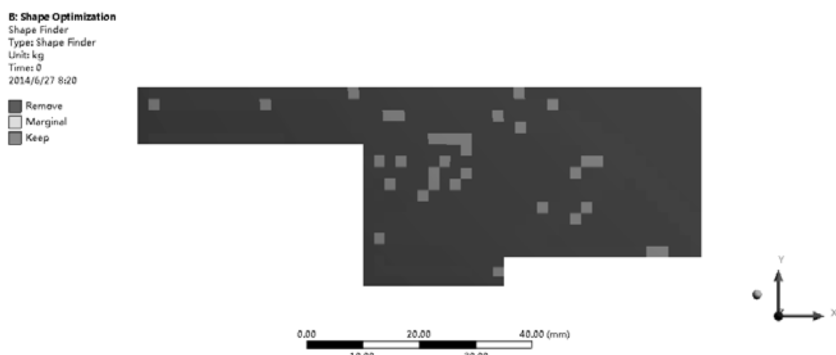


图 12-17　拓扑优化结果

9．保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

12.2.4　实例总结

本节以夹钳为例讲解了 ANSYS Workbench 的拓扑优化分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：如果【Toolbox（工具箱）】的【Analysis Systems】下没有【Shape Optimization（Beta）】选项，可选择【Tools】|【Options】命令，在弹出的【Options】对话框中选择【Appearance】选项，勾选右侧的【Beta Options】复选框即可出现。

12.3　实例 2——连接片结构优化分析

12.3.1　实例说明

如图 12-18 所示连接片，右端圆孔固定，左端长孔施加 490N 压力，对连接片厚度 2mm、椭圆孔长度 15mm 和片长 55mm 参数进行优化，优化使其一阶振型变形最小。

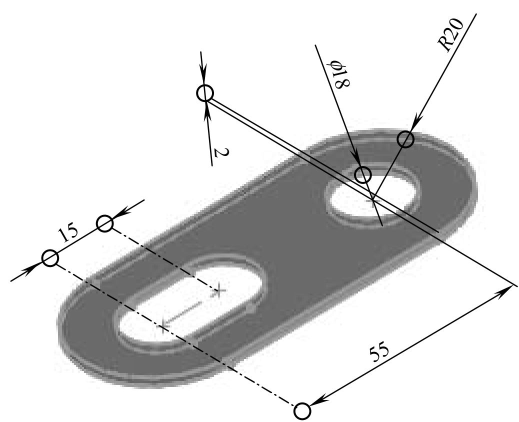


图 12-18　连接片结构

12.3.2　分析思路

本例选择直接优化方法，首先通过结构静力学分析来获得模态分析的预应力，然后进行模态分析，选择一阶振型最大变形量为目标函数，然后通过直接优化方法来得到优化参数的最优解。

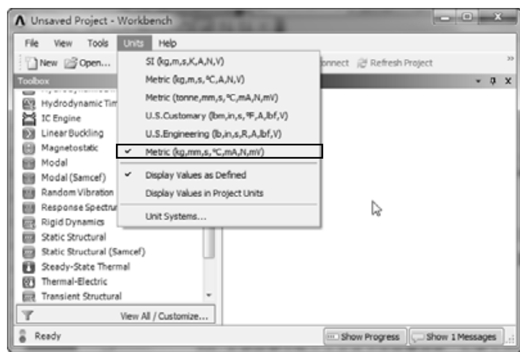
12.3.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s,℃,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 12-19 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目A，如图 12-20所示。


图 12-19　设置分析单位

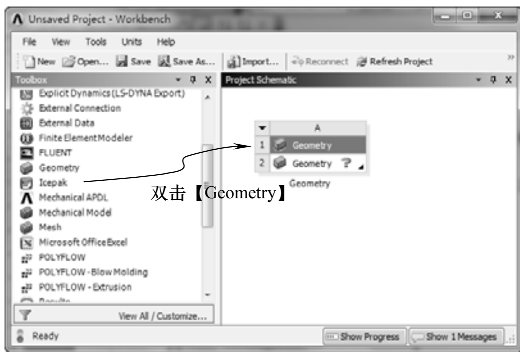


图 12-20　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Static Structure】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色

高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 12-21 所示。

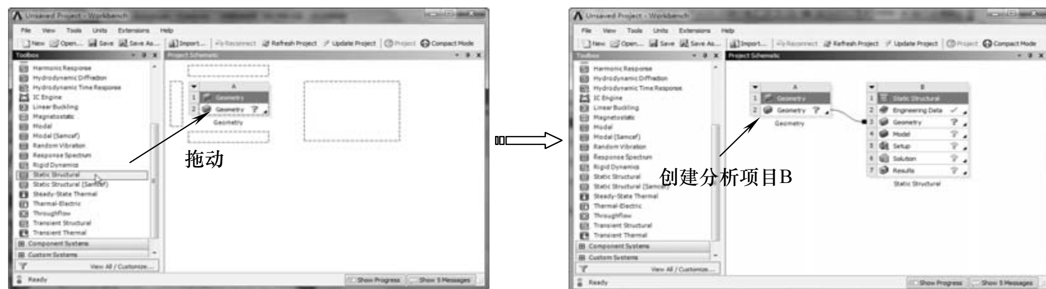


图 12-21 创建分析项目 B

5）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Modal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 B 中的 B6 上，当 B6 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 C，如图 12-22 所示。

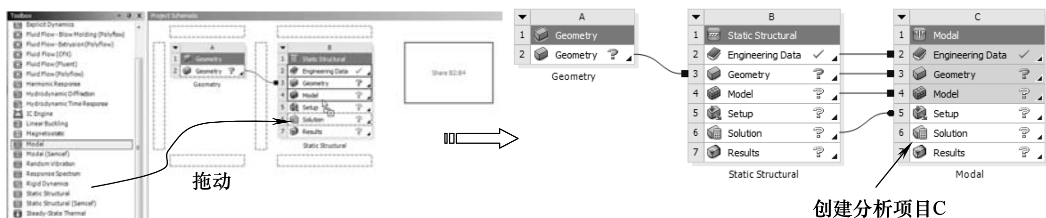


图 12-22 创建分析项目 C

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 12-23 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter12\12.3\uncompleted\lianjiepian.sldprt”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的？变为✓，表明实体模型已经添加。

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，并弹出【ANSYS Workbench】对话框，选择【Millimeter】单选按钮设置 mm 单位，如图 12-24 所示。

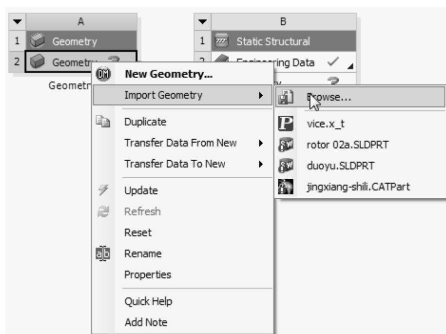


图 12-23 选择【Import Geometry】|【Browse】命令

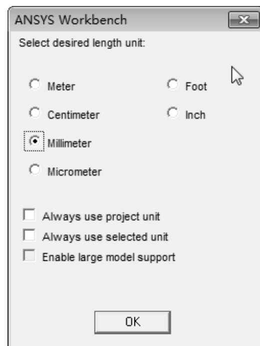


图 12-24 【ANSYS Workbench】对话框

4）进入 DM 后，设计树中【Import1】节点前面显示⚡，表示需要生成，图形窗口没有图形显示。单击 Generate 按钮，生成几何体，即可在窗口右侧显示出几何图形。分别单击详细设置窗口下的【3 Parameters】下的 3 个 DS 开头参数，使其前面显示 P 符号，可将该 3 个参数设置为参数化，如图 12-25 所示。

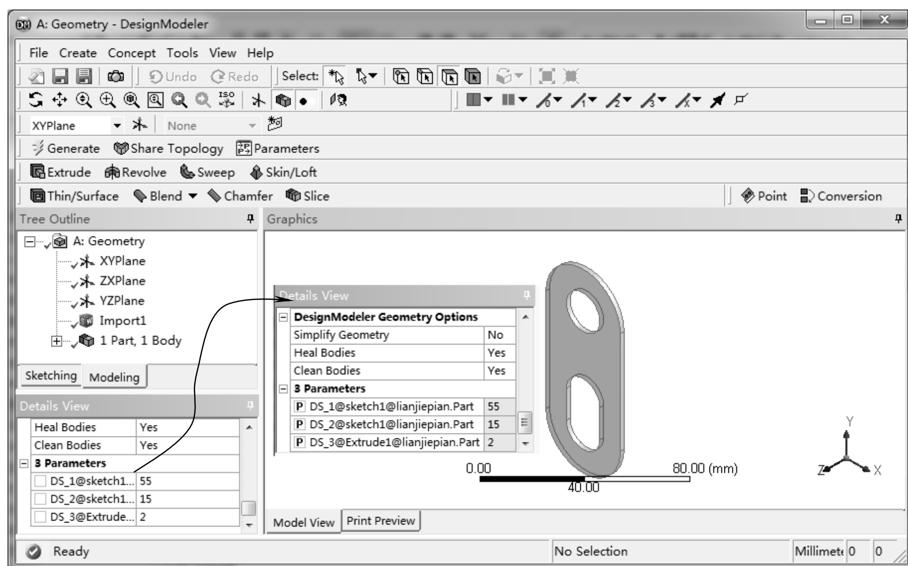


图 12-25　生成几何图形后的 DesignModeler 界面

5）在 DesignModeler 界面，单击右上角的 按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

6）单击 按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适文件路径和名称后，单击【保存】按钮保存项目。

3．添加材料库

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料。

4．添加模型材料属性

本例中为了简化分析过程，选择的材料为 Structural Steel，该材料为 ANSYS Workbench 系统默认材料，所以不用为模型实体添加材料。

5．划分网格

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 12-26 所示。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，单击窗口上方图形选择工具栏上的【Body（选择体）】按钮 ，在【Details of “Body Sizing”Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区单击选择实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 2mm，如图 12-27 所示。

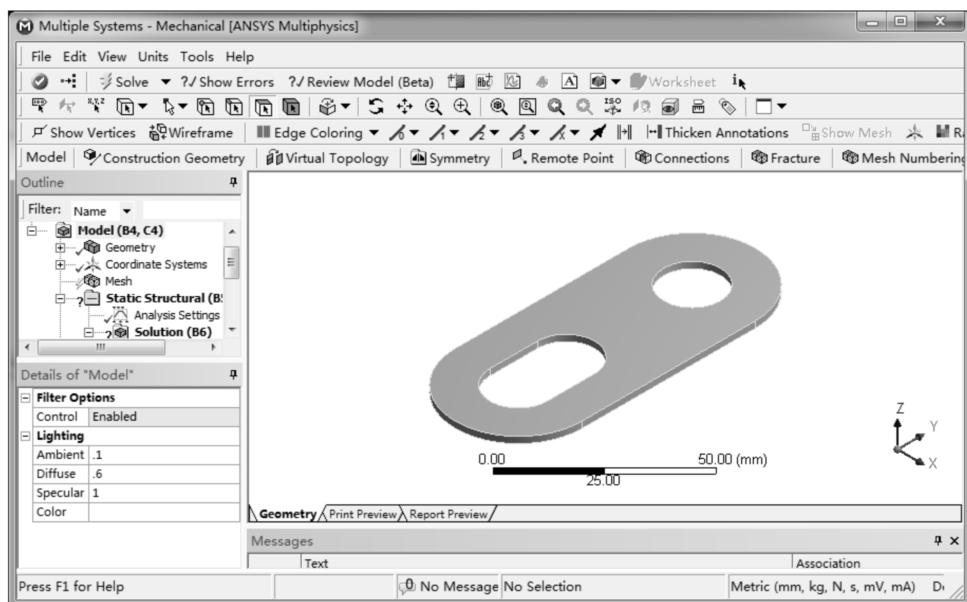


图 12-26　Mechanical 界面

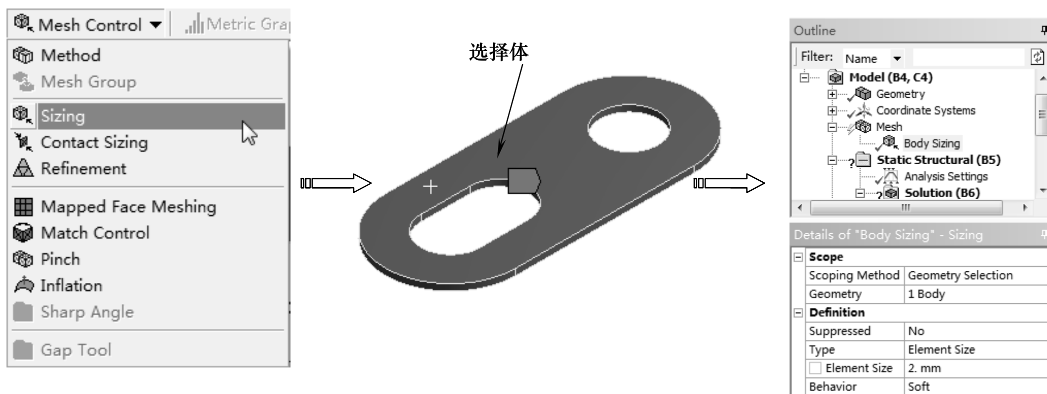


图 12-27　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 12-28 所示。

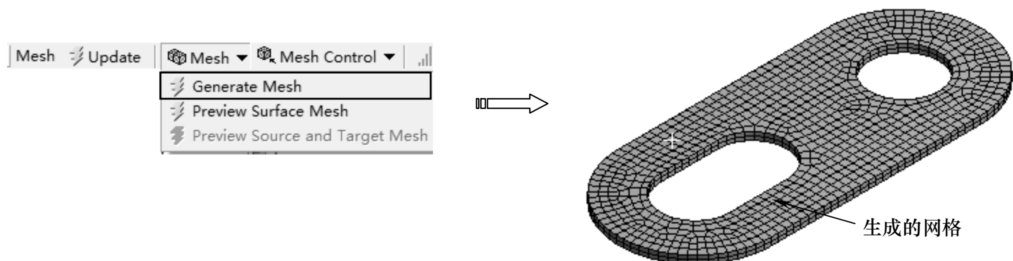


图 12-28　生成网格

6．施加静力载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Static Structural（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Supports】|【Fixed Support（固定约束）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Fixed Support”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择圆柱面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，如图 12-29 所示。

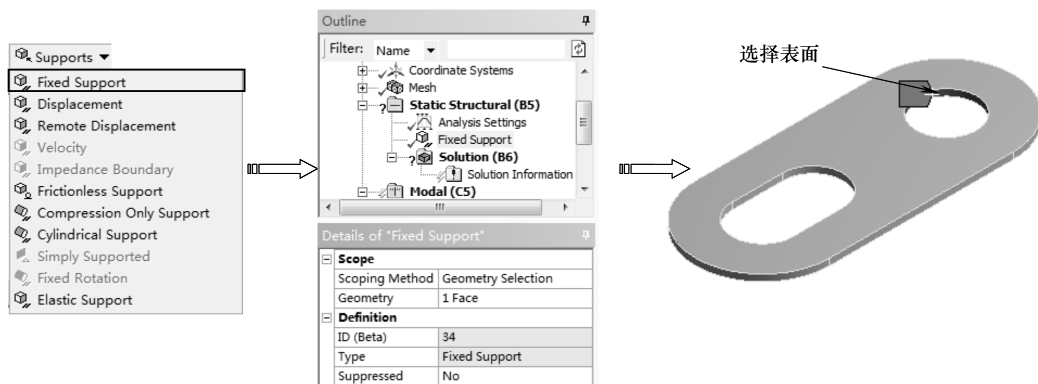


图 12-29　施加固定约束

3）单击【Environment】工具栏上的【Loads】|【Force】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，在【Details of“Force”】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，选择图 12-30 所示圆柱面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮，在【Y Component】文本框中输入−490，如图 12-30 所示。

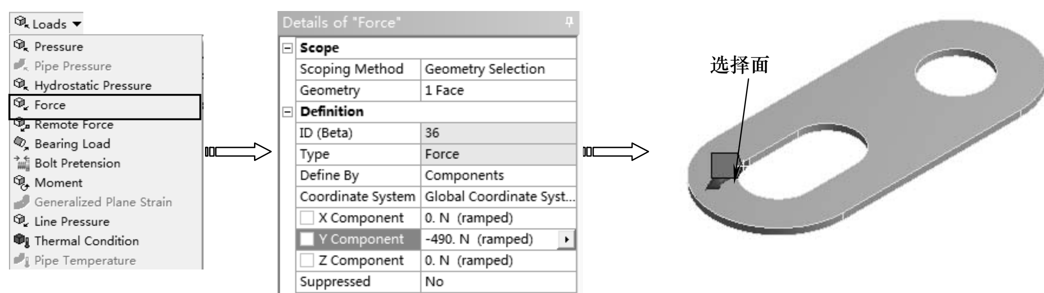


图 12-30　施加力

7．设置静力学分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解变形。单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 12-31 所示。

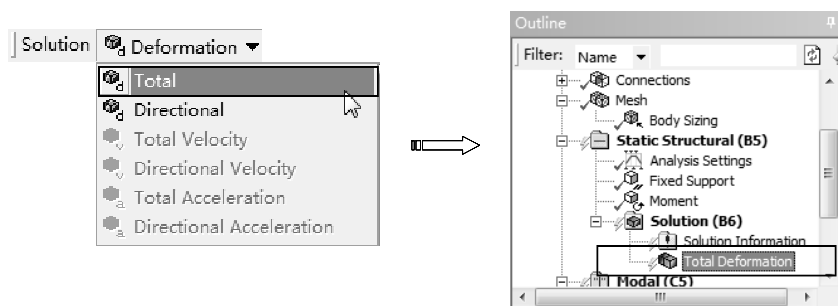


图 12-31　添加变形求解项

3）求解应力。单击【Solution】工具栏上的【Stress】|【Equivalent（von-Mises)】命令，此时在分析树中插入【Equivalent Stress】项，如图 12-32 所示。

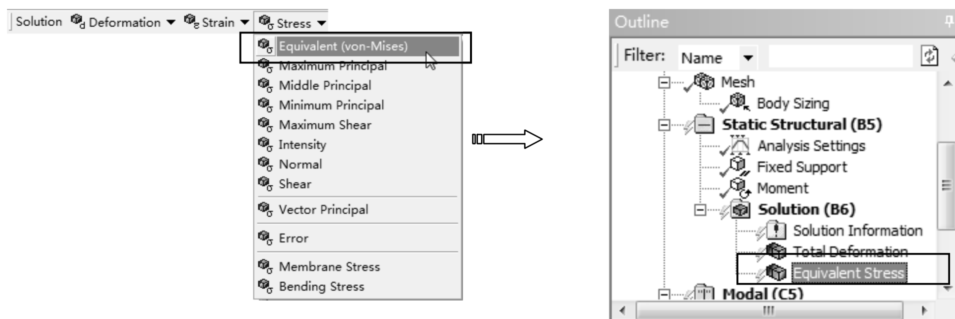


图 12-32　添加应力求解项

8．求解静力学并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 12-33 所示。

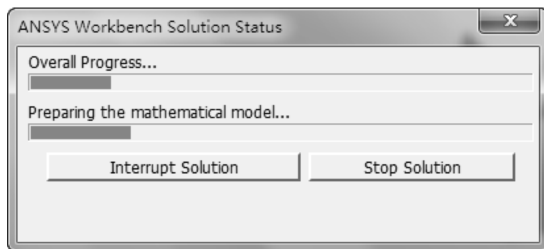


图 12-33　求解进度条

2）应变云图。在【Outline（分析树)】中选择【Solution（B6)】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation，在图形窗口显示出应变云图，如图 12-34 所示。

3）应力云图。在【Outline（分析树)】中选择【Solution（B6)】节点，单击其下的【Equivalent Stress】项 Equivalent Stress，在图形窗口显示出应力云图，如图 12-35 所示。



图 12-34 应变云图



图 12-35 应力云图

9．设置模态分析求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Modal（C5）】节点下的【Analysis Settings】项，将【Detail of “Analysis Settings”】中的【Max Modes to Find】设置为 6，求解前 6 节模态，如图 12-36 所示。

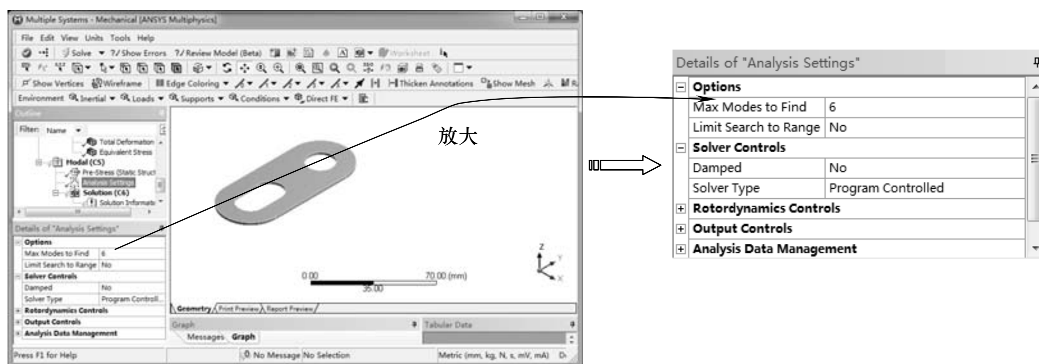


图 12-36 设置模态求解参数

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点，单击【Solution】工具栏上的【Deformation】|【Total】命令，此时在分析树中插入【Total Deformation】项，如图 12-37 所示。

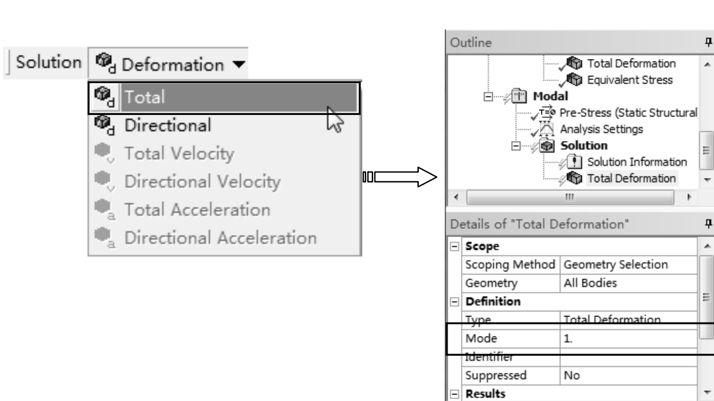


图 12-37 设置求解模态变形

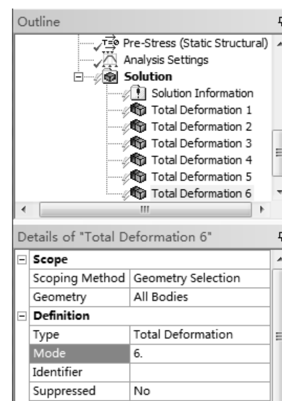


图 12-38 插入模态求解结果

3）同理，插入其他 5 个模态求解结果，如图 12-38 所示。

10．模态分析求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 12-39 所示。

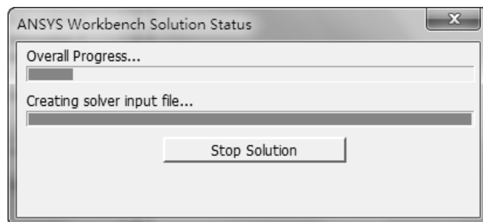


图 12-39　求解进度条

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在图形窗口显示出一阶振型。

3）采用相同的方法可以观察其他的各阶模态的分析结果，如图 12-40 所示。



图 12-40　各阶模态振型

4）在 Mechanical 界面的右下方可以观察到模型的固有频率，如图 12-41 所示。

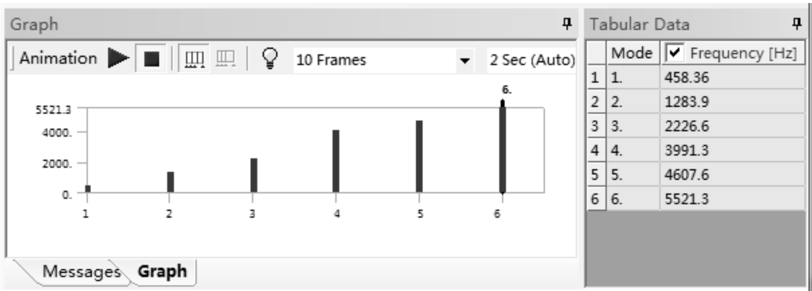


图 12-41　模型的固有频率

11．设定目标函数

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（C6）】节点下的【Total Deformation 1】选项，在详细设置窗口中选中【Results】选项下的【Maximum】，使其前面显示为 P，设置最大变形量为目标函数，如图 12-42 所示。

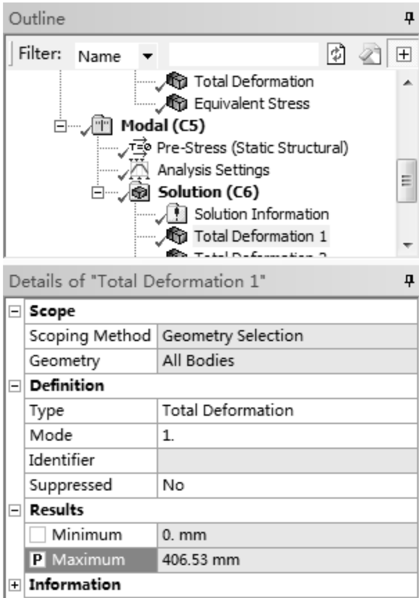


图 12-42　设置最大变形量为目标函数

2）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

12．启动直接优化分析

1）双击【Toolbox（工具箱）】中【Design Exploration】下的【Direct Optimization】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 D，如图 12-43 所示。

2）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 D 的 D2 栏的【Optimization】项，进入直接优化分析界面，如图 12-44 所示。

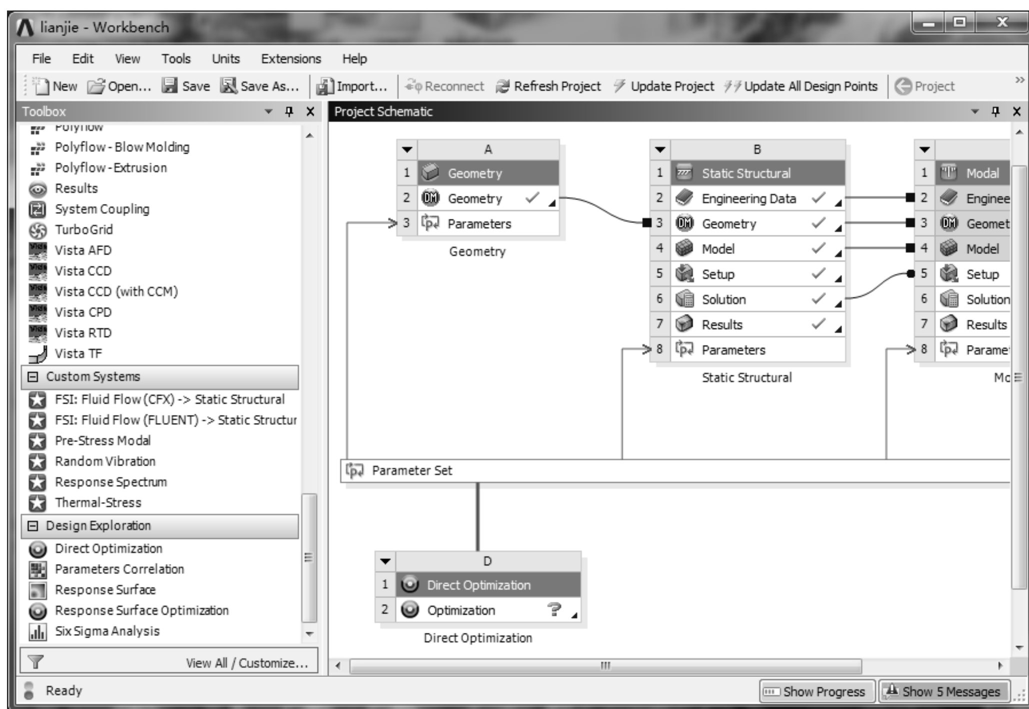


图 12-43　启动直接优化工具

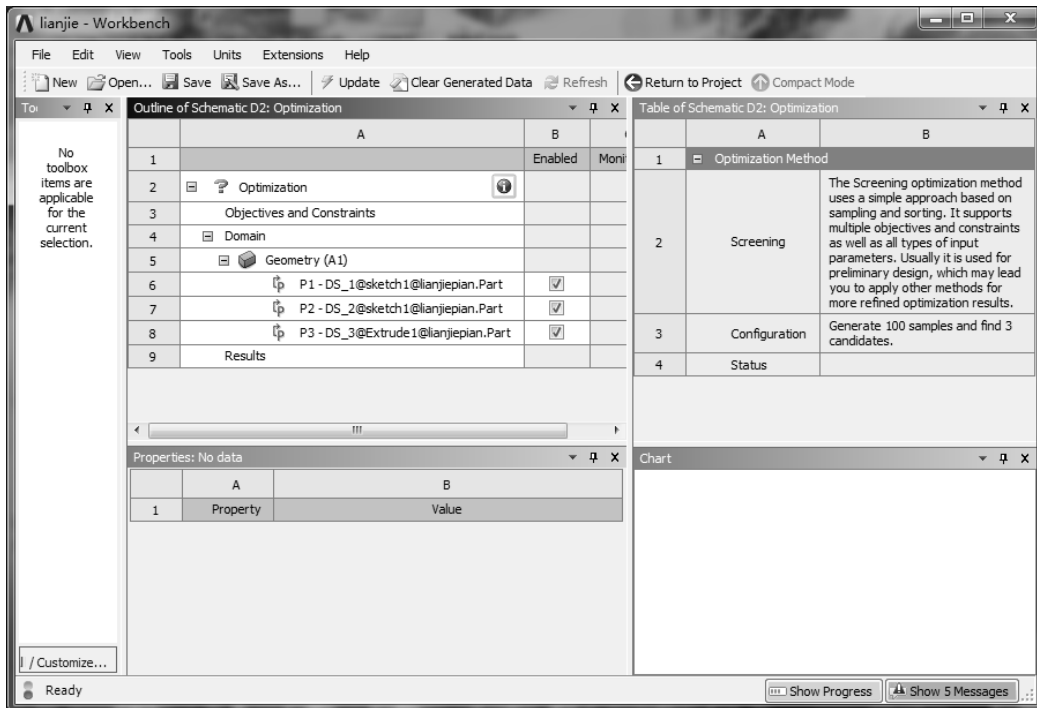


图 12-44　直接优化分析界面

3）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择【Domain】

下的 P3-DS_1 参数，然后在【Properties of Outline A6：P1】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-45 所示。

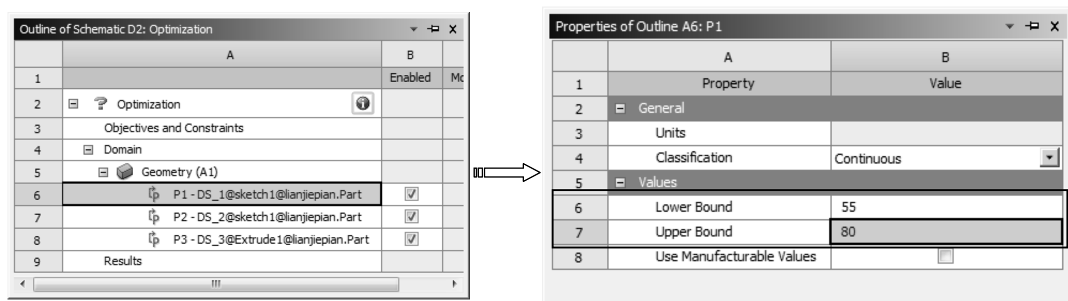


图 12-45　设置输入参数 P1 的范围

4）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择【Domain】下的 P2-DS_2 参数，然后在【Properties of Outline A7：P2】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-46 所示。

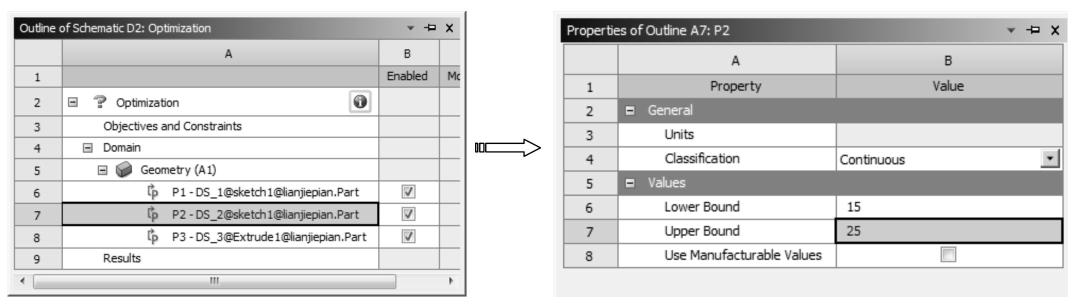


图 12-46　设置输入参数 P2 的范围

5）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择【Domain】下的 P1-DS_3 参数，然后在【Properties of Outline A8：P3】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-47 所示。

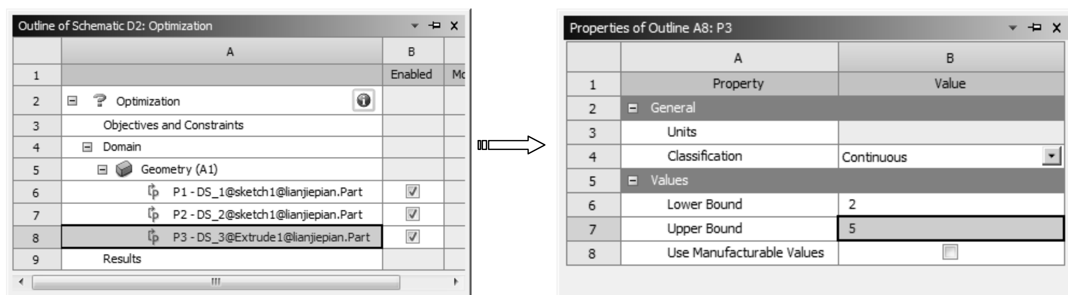


图 12-47　设置输入参数 P3 的范围

6）设置优化判定准则。在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择 A3 栏中的【Objectives and Constraints】选项，然后在【Table of Schematic D2：Optimization】窗口中设置判定准则为 Minimize P4，如图 12-48 所示。

Table of Schematic D2: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P4	P4 - Total Deformation 1 Maximum	Minimize		No Constraint		
*		Select a Parameter					

图 12-48　设定优化判定准则

7）设置样本数和候选数。在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择 A2 栏中的【Optimization】选项，然后在【Properties of Schematic D2:Optimization】窗口中设置【Number of Samples】为 15、【Maximum Number of Candidates】为 3，如图 12-49 所示。

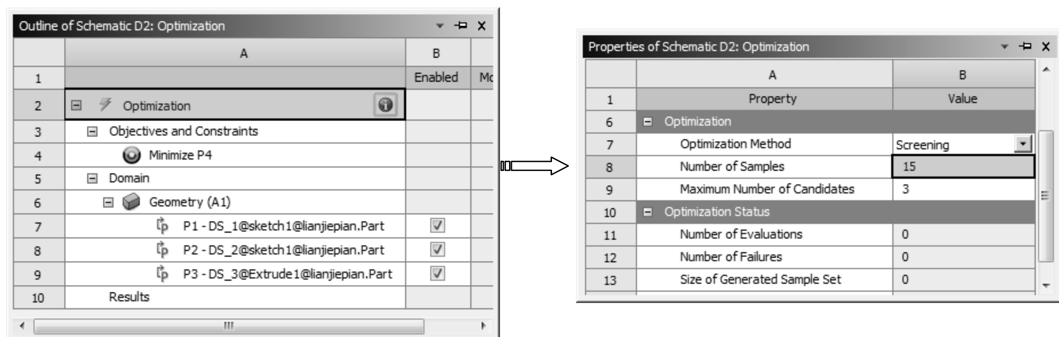


图 12-49　设置样本数和候选数

13．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Update】按钮 Update ，更新计算完成后在【Table of Schematic D2：Optimization】窗口显示优化信息并显示 3 个候选设计点，如图 12-50 所示。

Table of Schematic D2: Optimization

	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Minimize P4	Goal, Minimize P4 (Default importance)		
3	Optimization Method			
4	Screening	The Screening optimization method uses a simple approach based on sampling and sorting. It supports multiple objectives and constraints as well as all types of input parameters. Usually it is used for preliminary design, which m lead you to apply other methods for more refined optimization results.		
5	Configuration	Generate 15 samples and find 3 candidates.		
6	Status			
7	Candidate Points			
8		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
9	P1 - DS_1@sketch1@lianjiepian.Part	79.167	69.167	74.167
10	P2 - DS_2@sketch1@lianjiepian.Part	19.708	15.958	23.458
11	P3 - DS_3@Extrude1@lianjiepian.Part	4.5444	4.7667	4.2111
12	P4 - Total Deformation 1 Maximum (mm)	228.28	236.59	247.5

图 12-50　【Table of Schematic D2：Optimization】窗口

2）在【Outline of Schematic D2：Optimization】窗口中选择 A12 栏中的【Candidate Points】选项，显示 3 个候选点。在 Candidate Point1 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert as Design Point】命令，将候选点插入到设计空间，如图 12-51 所示。

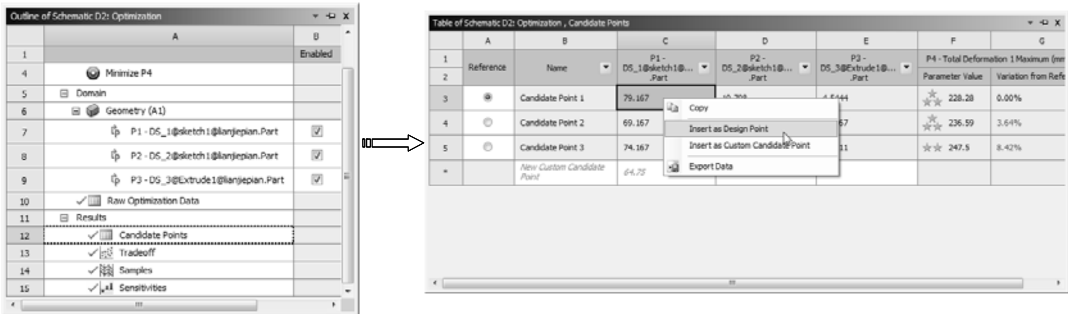


图 12-51　将候选点插入到设计空间

3）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

4）双击流程图中的【Parameters Set】选项，进入参数设置空间，在【Table of Design Points】窗口中选中 DP1（上一步插入到设计空间的候选设计点），单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Copy inputs to Current】命令，将设计点 DP1 输入参数复制到当前设计点，如图 12-52 所示。

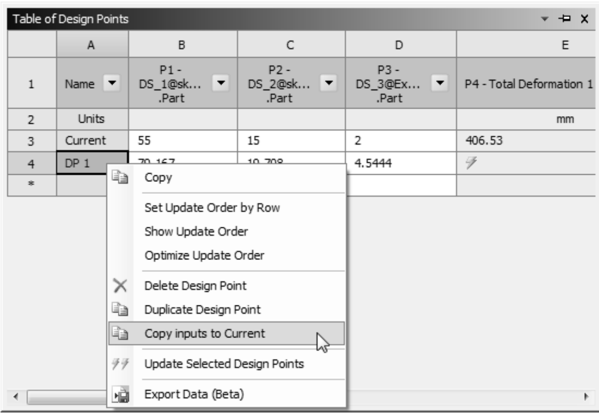


图 12-52　选择【Copy inputs to Current】命令

5）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

6）在流程图中选中 C7 栏中的【Results】单元格，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Update】命令，更新数据，如图 12-53 所示。

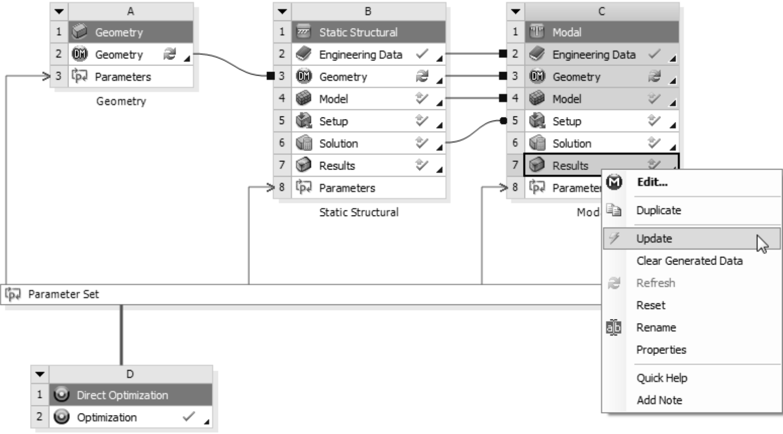


图 12-53　选择【Update】命令

7）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。

8）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Total Deformation】项 Total Deformation 1，在图形窗口显示出一阶振型，如图 12-54 所示。

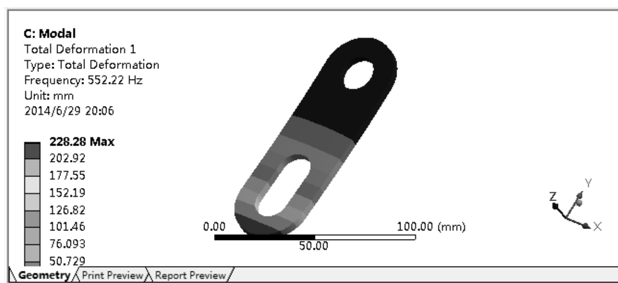
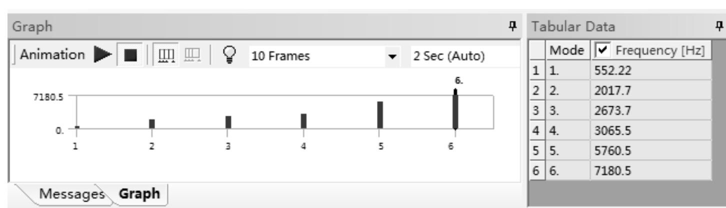


图 12-54　显示一阶振型

9）在 Mechanical 界面的右下方可以观察到模型的固有频率，如图 12-55 所示。



	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	552.22
2	2.	2017.7
3	3.	2673.7
4	4.	3065.5
5	5.	5760.5
6	6.	7180.5

图 12-55　模型的固有频率

14. 保存和退出

1）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮 Save，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮 退出。

12.3.4　实例总结

本节以连接片为例讲解了 ANSYS Workbench 的直接优化方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：优化参数可采用两种方法实现，一种方法是在三维软件中直接建立参数化模型，导入 Workbench 中的参数是认可的，但在三维软件中的参数必须以 DS_开头；另一种方法是在 Workbench 中直接建立模型，并设定参数即可。本例中选择第一种方法在 SolidWorks 软件中设置优化参数。

12.4　实例 3——散热器响应曲面优化分析

12.4.1　实例说明

如图 12-56 所示散热器，中间产生热量 20W，试用响应曲面优化方法优化中间凸台直径、翅片直径和翅片厚度。

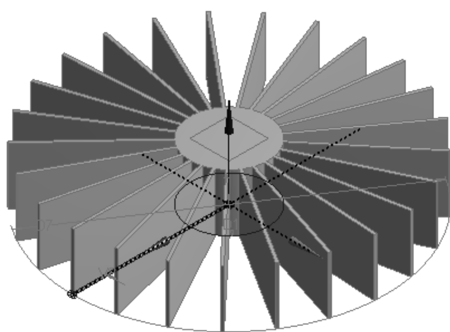


图 12-56　散热器结构

12.4.2　分析思路

本例选择响应曲面优化方法，首先通过稳态热分析来获得散热器温度场分布，然后分别设置凸台直径、翅片直径和翅片厚度作为优化参数，选择质量和温度为目标函数，通过响应曲面优化获得动态显示优化参数和设计目标之间的关系，最后通过优化方法来得到优化参数的最优解。

12.4.3　具体分析过程

1. 启动 Workbench 并建立分析项目

1）双击桌面上的【Workbench14.5】图标，启动 ANSYS 14.5 Workbench，进入用户操作界面。

2）选择【Units】|【Metric（kg,mm.s, °C,mA,N,mV）】命令，设置分析单位，如图 12-57 所示。

3）双击【Toolbox（工具箱）】中【Component Systems】下的【Geometry】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 A，如图 12-58 所示。

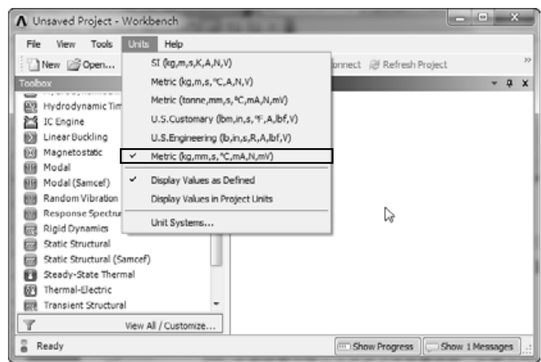


图 12-57　设置分析单位

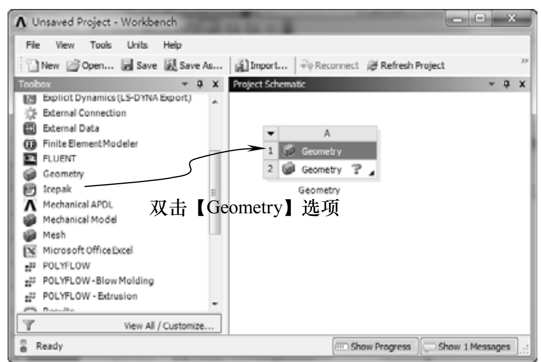


图 12-58　创建分析项目 A

4）在【Toolbox（工具箱）】中【Analysis Systems】下的【Steady-State Thermal】选项上按住鼠标左键，拖动到【Project Schematic（项目管理区）】分析项目 A 中的 A2 上，当 A2 呈红色高亮显示时，释放鼠标创建分析项目 B，如图 12-59 所示。

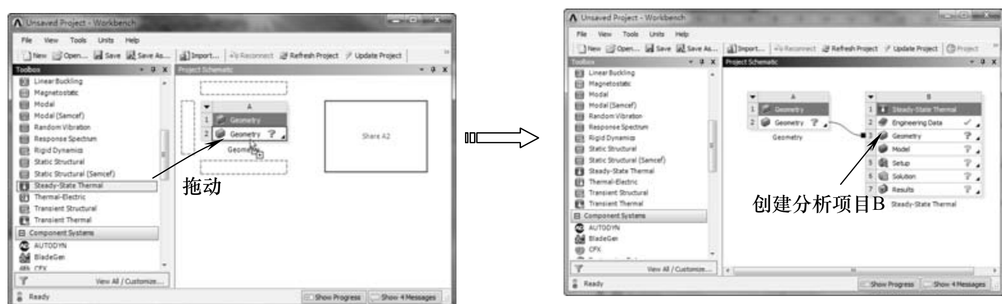


图 12-59　创建分析项目 B

2．导入几何体模型

1）在 A2 栏的【Geometry】项上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Import Geometry】|【Browse】命令，如图 12-60 所示，弹出【打开】对话框。

2）在弹出的【打开】对话框中选择文件路径，导入随书光盘中的“\Chapter12\12.4\uncompleted\sanreqi.agdb”几何体文件。此时，A2 栏的【Geometry】项后面的?变为✓，表明实体模型已经添加。

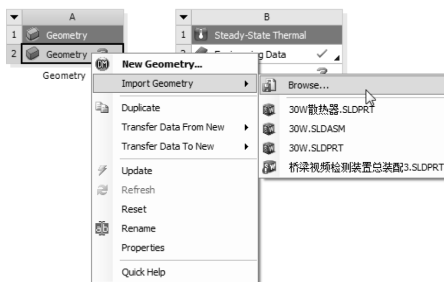


图 12-60　选择【Import Geometry】|【Browse】命令

3）双击项目 A 中的 A2 栏的【Geometry】项，此时会进入到 DesignModeler 界面，在窗口右侧显示出几何图形，如图 12-61 所示。

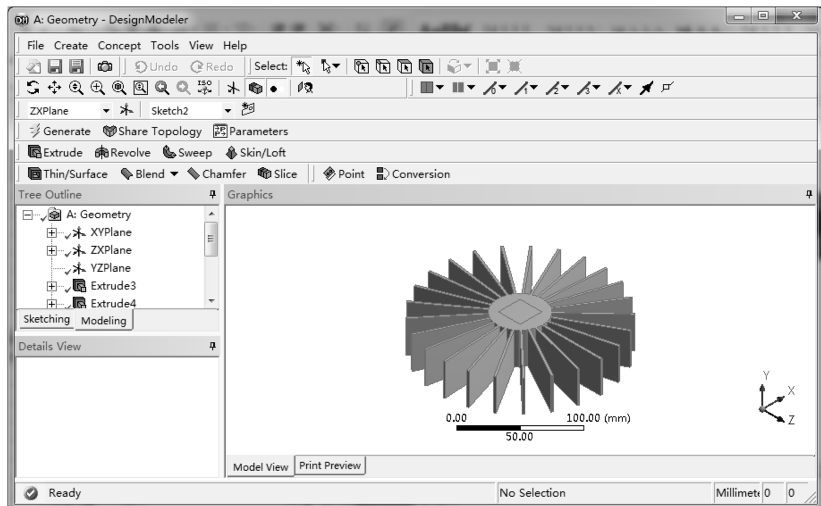


图 12-61　DesignModeler 界面

4）在设计树中选择草图 Sketch1，在详细设置窗口中单击 D1 前的方框，使其显示 P 符号，表示该参数作为优化输入参数，系统弹出参数名称设置对话框，输入 DS_1dim，单击【OK】按钮完成，如图 12-62 所示。

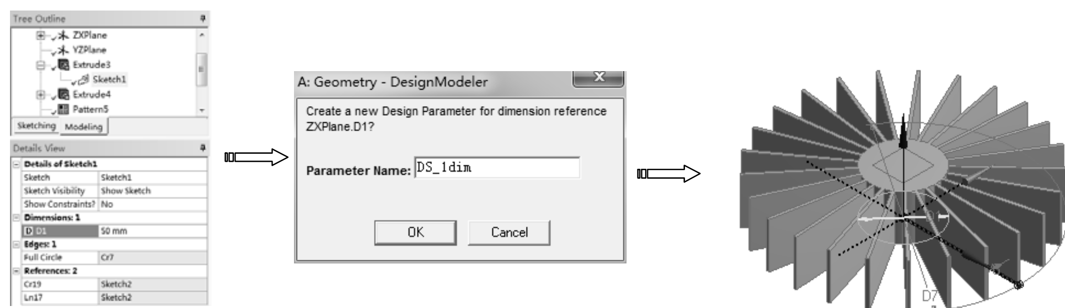


图 12-62　设置优化参数 1

5）在设计树中选择草图 Sketch2，在详细设置窗口中单击 D7 前的方框，使其显示 P 符号，表示该参数作为优化输入参数，系统弹出参数名称设置对话框，输入 DS_2dim，单击【OK】按钮完成，如图 12-63 所示。

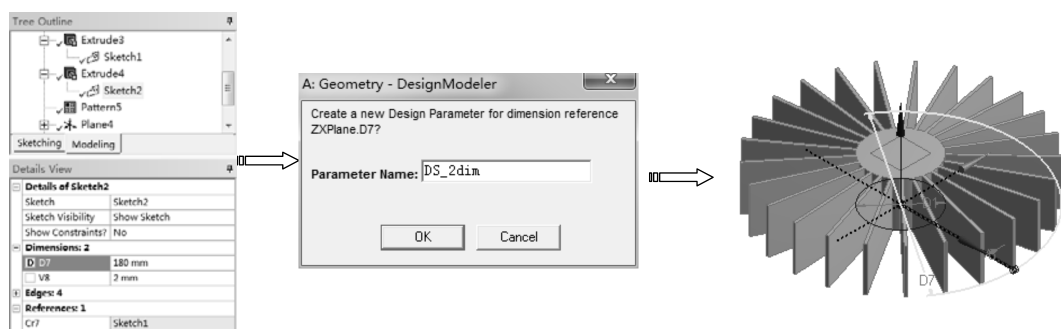


图 12-63　设置优化参数 2

6）在设计树中选择草图 Sketch2，在详细设置窗口中单击 V8 前的方框，使其显示 P 符号，表示该参数作为优化输入参数，系统弹出参数名称设置对话框，输入 DS_3th，单击【OK】按钮完成，如图 12-64 所示。

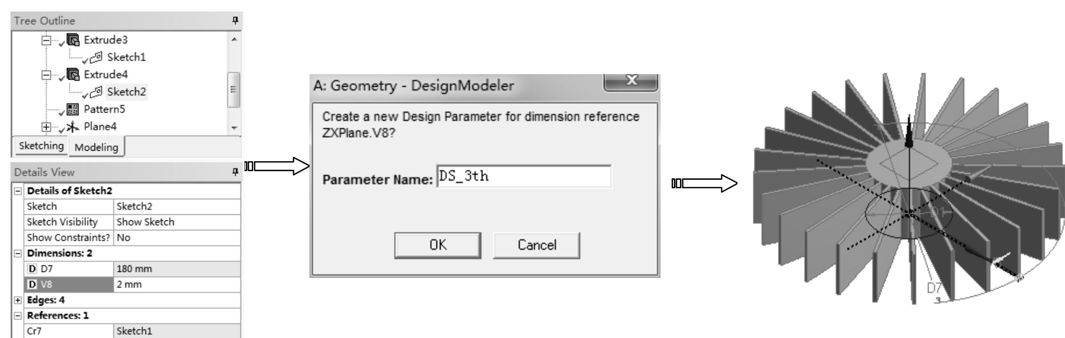


图 12-64　设置优化参数 3

7）单击按钮，弹出【另存为】对话框，选择合适的文件路径和名称后（chip.wbpj），单击【保存】按钮保存项目。

8）回到 DesignModeler 界面，单击右上角的按钮，退出 DesignModeler 界面，返回到 ANSYS Workbench 主界面。

3．添加材料库

1）双击项目 B 中的 B2 栏的【Engineering Data】项，进入图 12-65 所示的材料参数设置界面。

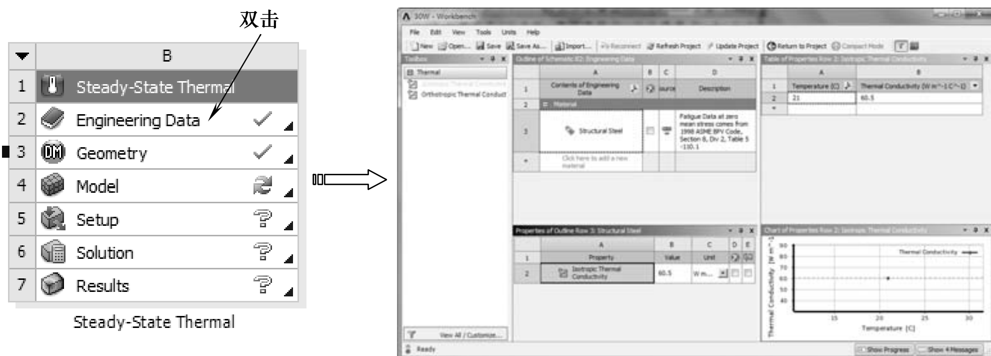


图 12-65　双击【Engineering Data】选项

2）在界面的空白处任意位置单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，原界面窗口中的【Outline of Schematic B2：Engineering Data】窗口消失，取代以【Engineering Data Sources（工程数据源）】和【Outline of Favorite（优先列表）】窗口，如图 12-66 所示。

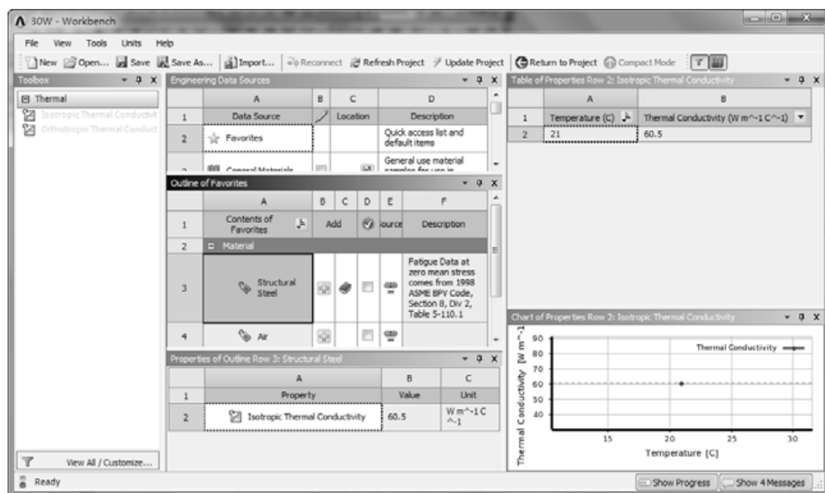


图 12-66　材料参数设置界面

3）在【Engineering Data Sources（工程数据源）】窗口中选中 A3 栏中的【General Materials（通用材料）】项，出现【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口，如图 12-67 所示。

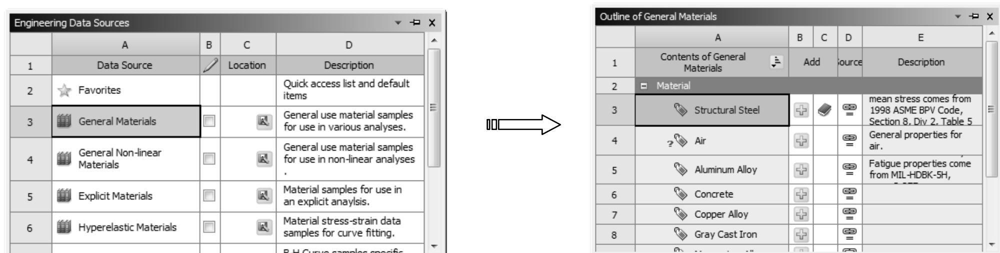


图 12-67　选择【General Materials】项

4）在【Outline of General Materials（通用材料列表）】窗口中单击 B4 栏的按钮，此时在 C4 栏上会出现（使用中的）标志，表明材料已经添加到分析项目之中，如图 12-68 所示。

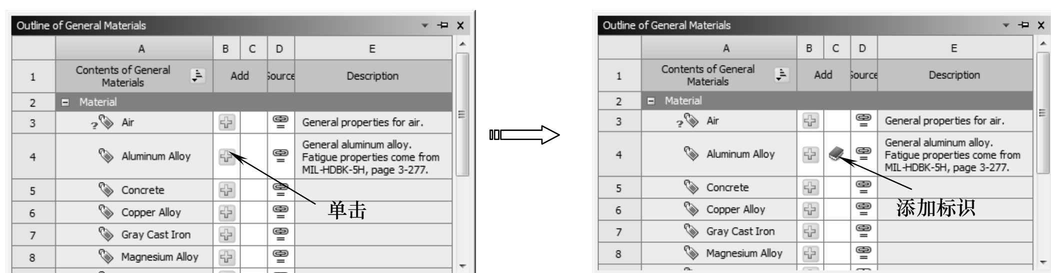


图 12-68　添加 Aluminum Alloy

5）在窗口的任意空白处单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Engineering Data Sources（工程数据源）】命令，返回到初始材料设置窗口并显示添加的材料，单击 Return to Project 按钮返回到项目管理区。

4．添加模型材料属性

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏中的【Model】项，进入 Mechanical 界面。在该界面下可进行网格划分、分析设置、结果观察等，如图 12-69 所示。

2）选择【Units】|【Metric（m,kg,N,s,V,A）】命令，设置分析单位，如图 12-70 所示。

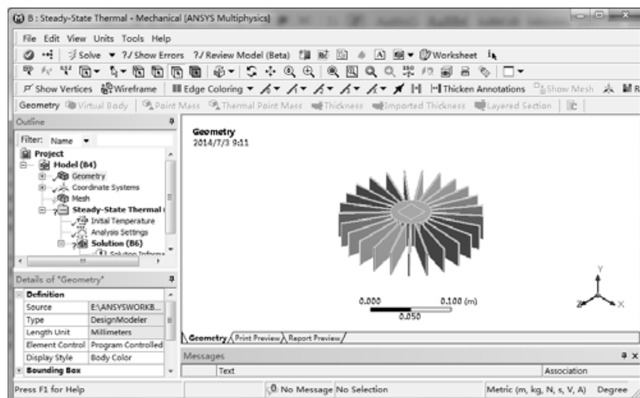


图 12-69　Mechanical 用户界面

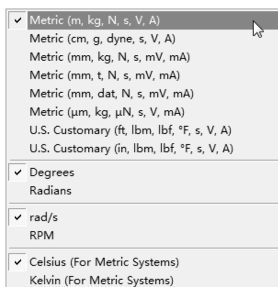


图 12-70　设置分析单位

3）在窗口左侧【Outline（分析树）】中选择【Geometry】节点下的【Solid】项，此时在【Details of“Solid”（参数列表）】显示模型参数。单击【Material】节点下的【Assignment】

选项，然后单击▸按钮，选择【Aluminum Alloy】项，将材料设置为铝合金，如图 12-71 所示。

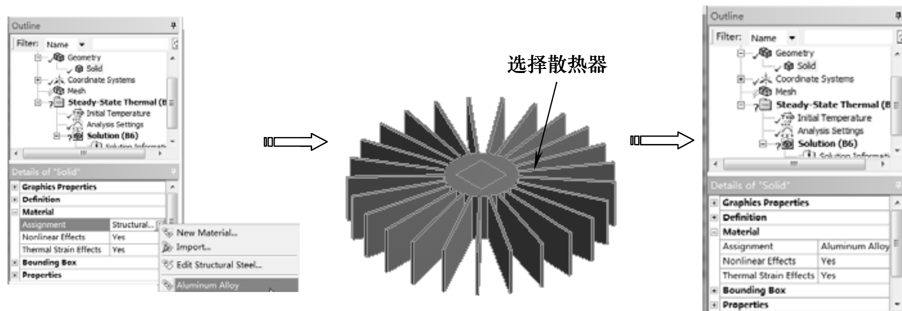


图 12-71　设置散热器材料

5．划分网格

1）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh Control（网格控制）】|【Sizing（尺寸）】命令，为网格划分添加尺寸控制。

2）单击窗口上方【图形选择】工具栏上的【Body（选择体）】按钮，在【Details of “Body Sizing” Sizing】列表中单击【Scope】选项下的【Scoping Method】项，在图形区框选所有实体，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Element Size】文本框中输入 5mm，如图 12-72 示。

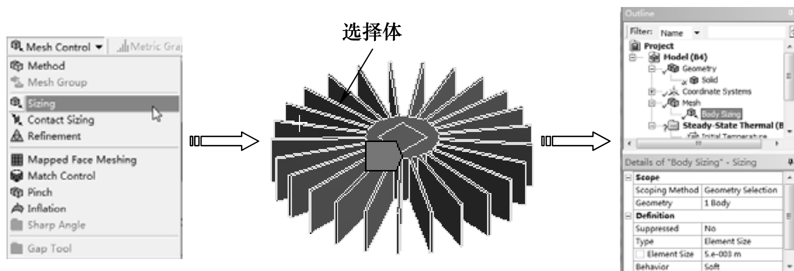


图 12-72　设置网格尺寸

3）在【Outline（分析树）】中选择【Mesh】节点，单击【Mesh】工具栏上的【Mesh（网格）】|【Generate Mesh（生成网格）】命令，将弹出网格生成进度条，表明正在划分网格。当网格划分完成后，进度条自动消失，最终生成效果如图 12-73 所示。

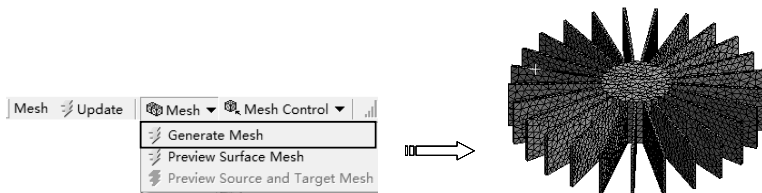


图 12-73　生成网格

6．施加载荷与边界条件

1）在【Outline（分析树）】中选择【Steady-State Thermal（B5）】节点，出现【Environment】工具栏。

2）单击【Environment】工具栏上的【Heat】|【Heat Flow】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Single Select（单选）】按钮，然后单击【Face（选择面）】按钮，选择如图 12-74 所示的面，单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Details of“Heat Flow”】列表中设置【Definition】选项下的【Magnitude】为 20W，如图 12-74 所示。

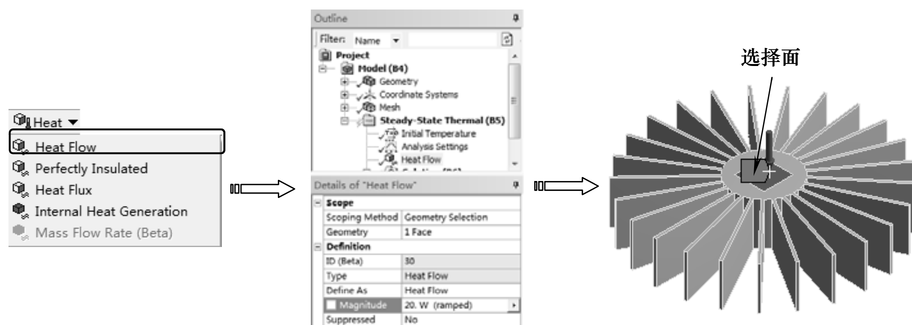


图 12-74　设置热流

3）单击【Environment】工具栏上的【Convection（对流）】命令，单击【图形】工具栏上的选择模式下的【Box Select（框选）】按钮，然后再单击【Face（选择面）】按钮，选择芯片除了上一步施加热流外的所有表面，在【Details of“Convection”】列表中单击【Geometry】项中的【Apply】按钮完成，在【Film Coefficient】中输入 5，如图 12-75 所示。

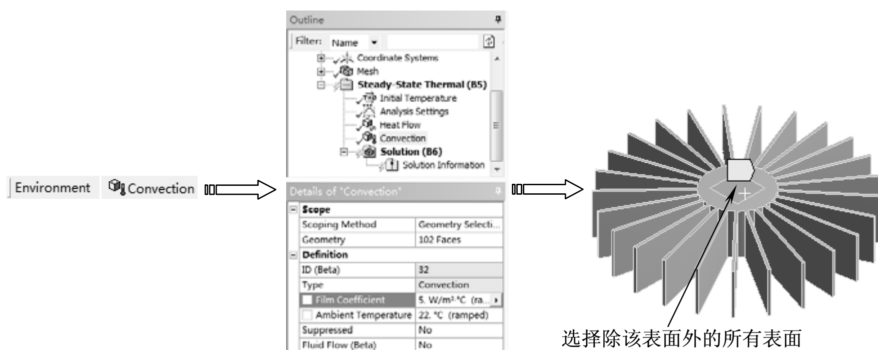


图 12-75　施加对流条件

7．设置求解项

1）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，出现【Solution】工具栏。

2）求解温度。单击【Solution】工具栏上的【Thermal】|【Temperature】命令，此时在分析树中插入【Temperature】求解项，如图 12-76 所示。

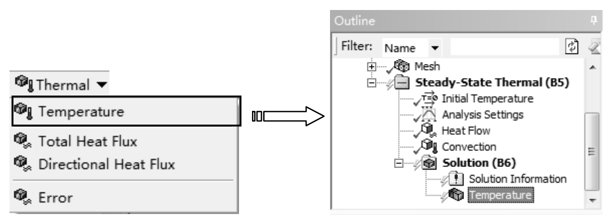


图 12-76　添加温度求解项

8．求解并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Solve】按钮 Solve ，启动求解，系统弹出进度条，表示正在求解。求解完成后进度条自动消失，如图 12-77 所示。

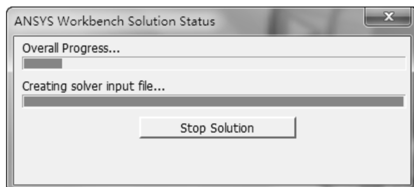


图 12-77　求解进度条

2）温度分析云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Temperature】项 Temperature ，在图形窗口显示温度分析云图，如图 12-78 所示。

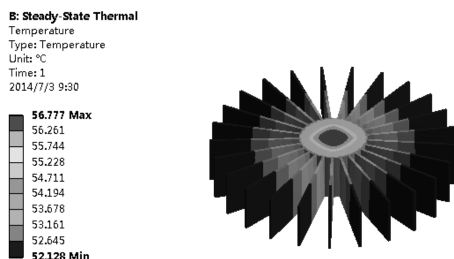


图 12-78　温度分析云图

9．设定目标函数

1）在【Outline（分析树）】中选择【Model（B4）】节点下的【Solid】选项，在详细设置窗口中选中【Properties】选项下的【Mass】，使其前面显示为 P，设置质量为目标函数，如图 12-79 所示。

2）在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点下的【Temperature】选项，在详细设置窗口中选中【Results】选项下的【Maximum】，使其前面显示为 P，设置最高温度为目标函数，如图 12-80 所示。

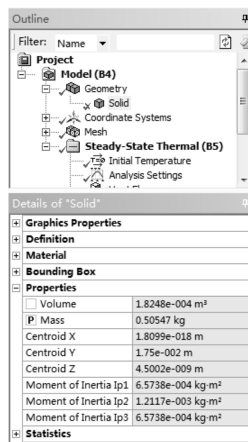


图 12-79　设置质量为目标函数

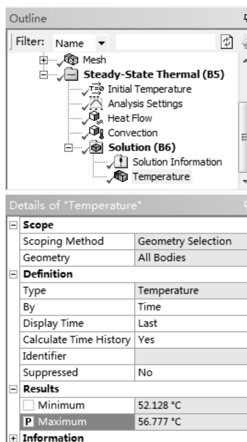


图 12-80　设置最高温度为目标函数

3）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

10．启动响应曲面优化分析

1）双击【Toolbox（工具箱）】中【Design Exploration】下的【Response Surface Optimization】选项，即可在【Project Schematic（项目管理区）】创建分析项目 C，如图 12-81 所示。

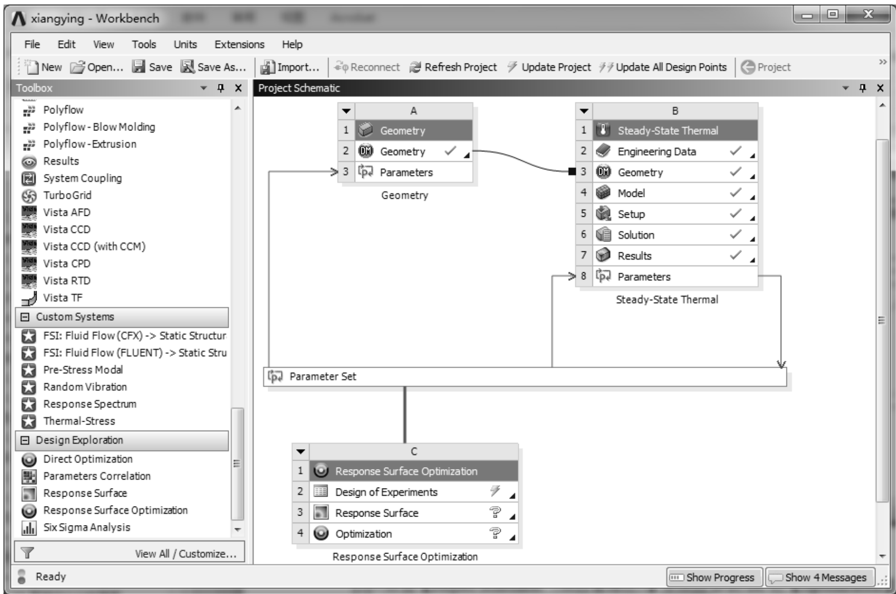


图 12-81　启动响应曲面优化工具

2）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C2 栏中的【Design of Experiments】项，进入实验设计界面，如图 12-82 所示。

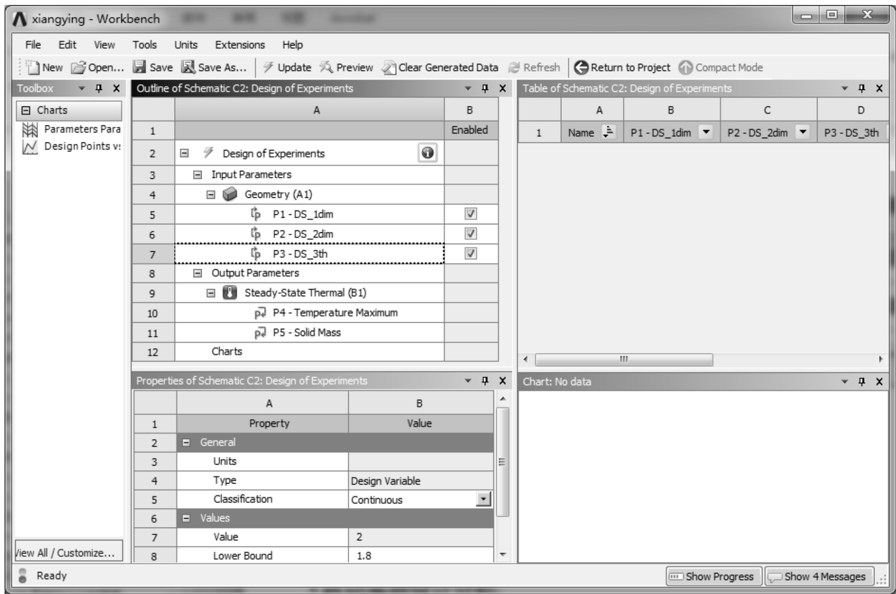


图 12-82　实验设计界面

3）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中选择【Geometry】下的 P1-DS_1dim 参数，然后在【Properties of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-83 所示。

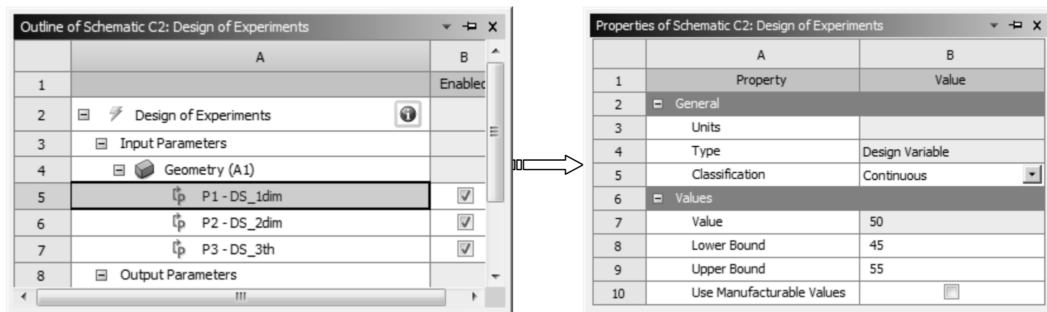


图 12-83　设置输入参数 P1 的范围

4）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中选择【Geometry】下的 P2-DS_2dim 参数，然后在【Properties of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-84 所示。

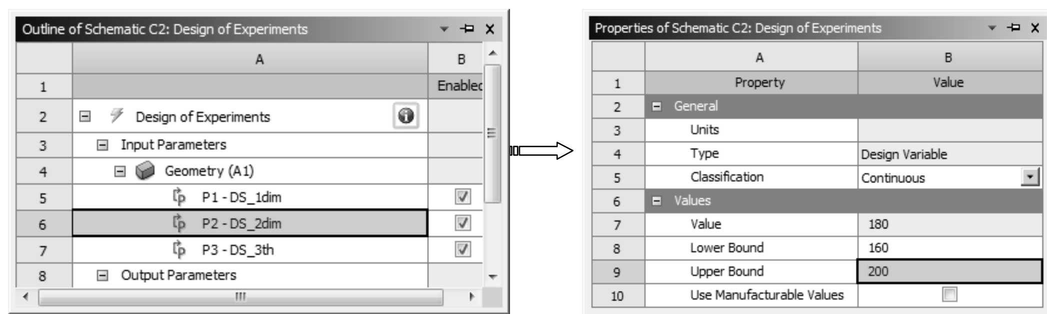


图 12-84　设置输入参数 P2 的范围

5）设置输入参数范围。在【Outline of Schematic C2：Design Experiments】窗口中选择【Geometry】下的 P3-DS_3th 参数，然后在【Properties of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中设置输入参数的初始值及上下限，如图 12-85 所示。

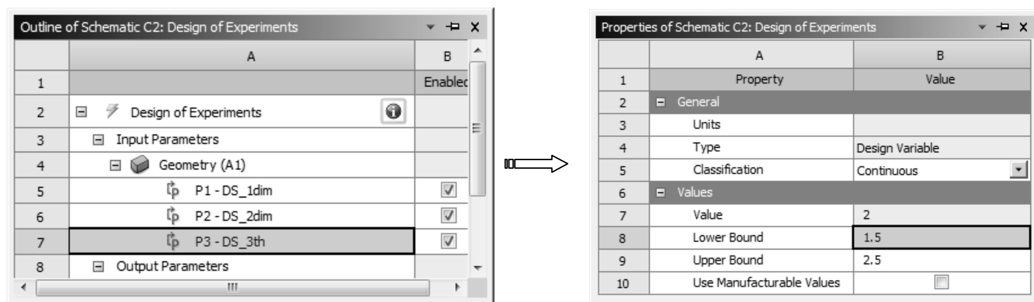


图 12-85　设置输入参数 P3 的范围

6）设置 DOE 类型。在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中选择 A2 栏中的【Design of Experiments】选项，然后在【Properties of Schematic C2: Design of Experiments】

窗口中设置【Design of Experiments Type】为 Central Composite Design，如图 12-86 所示。

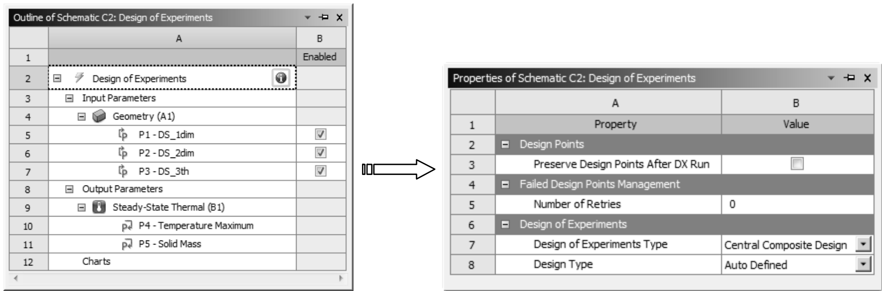


图 12-86　设置 DOE 类型

7）单击工具栏上的 Preview 按钮，即可在【Table of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中生成一组设计点数据，如图 12-87 所示，并在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中出现列表。

Table of Schematic C2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - DS_1dim	P2 - DS_2dim	P3 - DS_3th	P4 - Temperature Maximum (C)	P5 - Solid Mass (kg)
2	1	50	180	2		
3	2	45	180	2		
4	3	55	180	2		
5	4	50	160	2		
6	5	50	200	2		
7	6	50	180	1.5		
8	7	50	180	2.5		
9	8	45.935	163.74	1.5935		
10	9	54.065	163.74	1.5935		
11	10	45.935	196.26	1.5935		
12	11	54.065	196.26	1.5935		
13	12	45.935	163.74	2.4065		
14	13	54.065	163.74	2.4065		
15	14	45.935	196.26	2.4065		
16	15	54.065	196.26	2.4065		

图 12-87　生成设计点数据

11．求解设计点并显示分析结果

1）单击工具栏上的【Update】按钮 Update，更新计算完成后在【Table of Schematic C2：Design of Experiments】窗口显示相关性和设计点信息，如图 12-88 所示。

Table of Schematic C2: Design of Experiments (Central Composite Design : Auto Defined)

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - DS_1dim	P2 - DS_2dim	P3 - DS_3th	P4 - Temperature Maximum (C)	P5 - Solid Mass (kg)
2	1	50	180	2	56.777	0.50547
3	2	45	180	2	56.05	0.48143
4	3	55	180	2	57.526	0.53333
5	4	50	160	2	61.695	0.457
6	5	50	200	2	53.151	0.55395
7	6	50	180	1.5	57.628	0.42669
8	7	50	180	2.5	56.112	0.58427
9	8	45.935	163.74	1.5935	60.556	0.38817
10	9	54.065	163.74	1.5935	62.085	0.43438
11	10	45.935	196.26	1.5935	53.988	0.45097
12	11	54.065	196.26	1.5935	54.898	0.49718
13	12	45.935	163.74	2.4065	59.311	0.50427
14	13	54.065	163.74	2.4065	60.893	0.54246
15	14	45.935	196.26	2.4065	52.72	0.59912
16	15	54.065	196.26	2.4065	53.693	0.63731

图 12-88　【Table of Schematic C2：Design of Experiments】窗口

2）在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中选择 A14 栏中的【Design Points vs Parameter】选项，设置【Y-Axis（Left）】为 P4-Temperature Maximum，显示设计点与最大温度之间的关系，如图 12-89 所示。

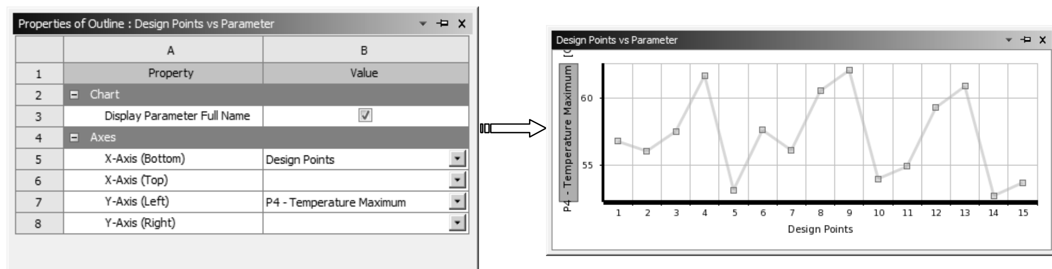


图 12-89　显示设计点与最大温度之间的关系

3）在【Outline of Schematic C2：Design of Experiments】窗口中选择 A14 栏中的【Design Points vs Parameter】选项，设置【Y-Axis（Left）】为 P5-Solid Mass，显示设计点与质量之间的关系，如图 12-90 所示。

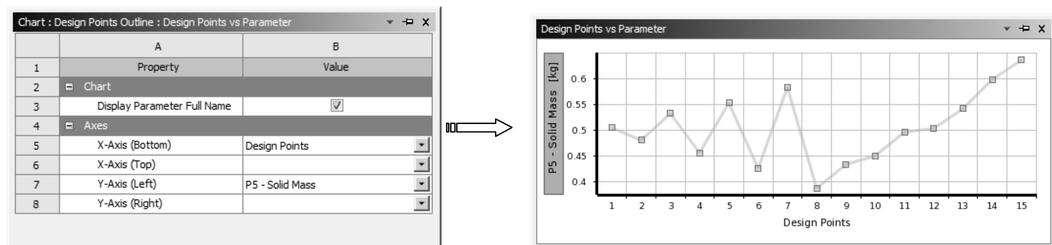


图 12-90　显示设计点与质量之间的关系

4）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

12．响应曲面分析

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C3 栏中的【Response Surface】项，进入响应曲面分析界面。单击工具栏上的【Update】按钮 Update 更新计算，在【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口显示相应曲面优化分析结果，如图 12-91 所示。

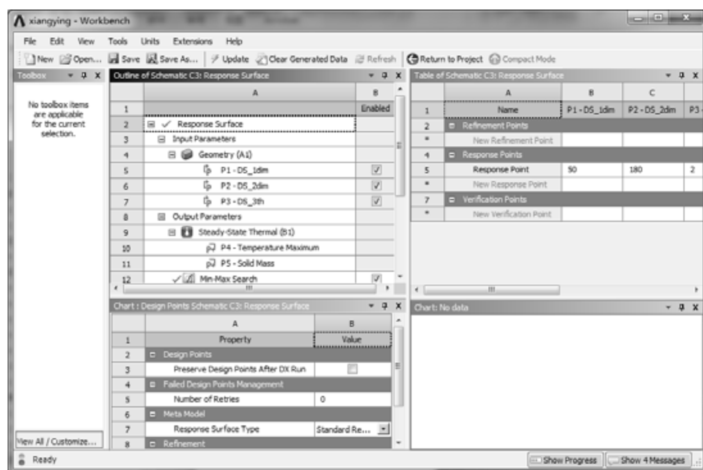


图 12-91　响应曲面分析结果

2）选择【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口中 A12 栏中的【Min-Max Search】选项，可显示出最大和最小设计点，如图 12-92 所示。

Table of Outline A12: Min-Max Search

	A	B	C	D	E	F
1	Name	P1 - DS_1dim	P2 - DS_2dim	P3 - DS_3th	P4 - Temperature Maximum (C)	P5 - Solid Mass (kg)
2	Output Parameter Minimums					
3	P4 - Temperature Maximum Minimum Design Point	45	200	2.5	51.935	0.62385
4	P5 - Solid Mass Minimum Design Point	45	160	1.5	61.543	0.36325
5	Output Parameter Maximums					
6	P4 - Temperature Maximum Maximum Design Point	55	160	1.5	63.509	0.42122
7	P5 - Solid Mass Maximum Design Point	55	200	2.5	53.054	0.66968

图 12-92　显示最大和最小设计点

3）选择【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口中 A17 栏中的【Response】选项，选择【Mode】为 2D，分别设置【X Axis】和【Y Axis】，此时设计参数和温度的 2D 关系如图 12-93 所示。

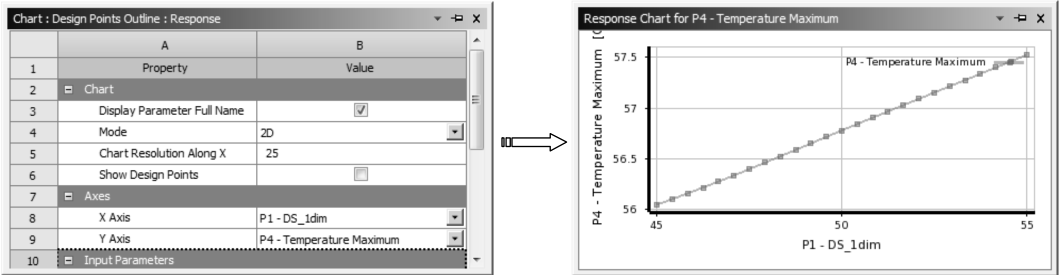


图 12-93　设计参数与温度的 2D 关系

说明：重复上述步骤可获得其他设计参数与其他目标函数的关系，此处不再重复，请读者自己练习。

4）选择【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口中 A17 栏中的【Response】选项，选择【Mode】为 3D，分别设置【X Axis】、【Y Axis】和【Z Axis】，此时设计参数和温度的 3D 关系如图 12-94 所示。

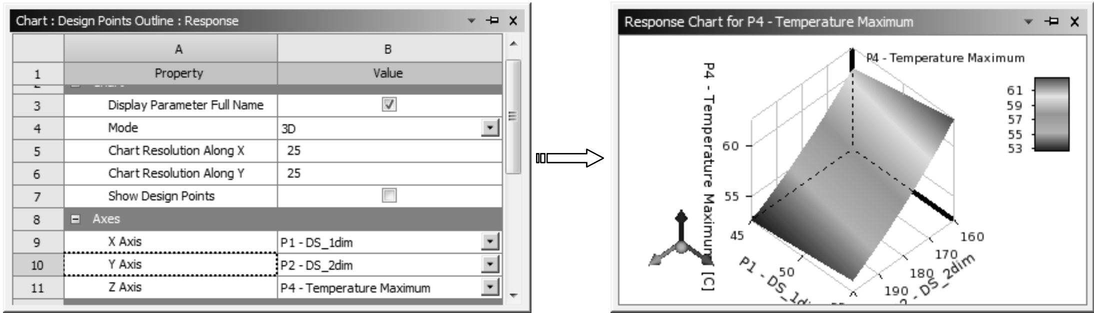


图 12-94　设计参数与变形的 3D 关系

说明：重复上述步骤可获得其他设计参数与其他目标函数的关系，此处不再重复，请读者自己练习。

5）选择【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口中 A18 栏中的【Local Sensitivity】选项，此时显示局部灵敏度关系，如图 12-95 所示。

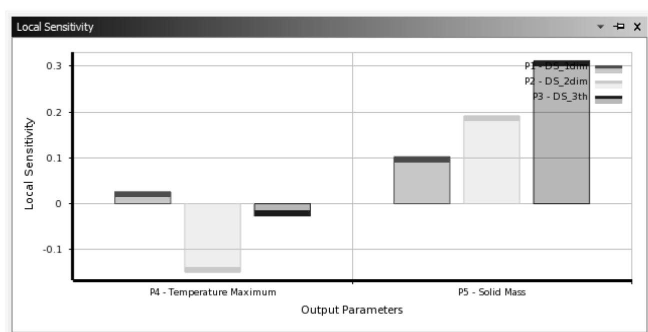


图 12-95　局部灵敏度关系图

6）选择【Outline of Schematic C3:Response Surface】窗口中 A20 栏中的【Spider】选项，此时显示蜘蛛图，如图 12-96 所示。

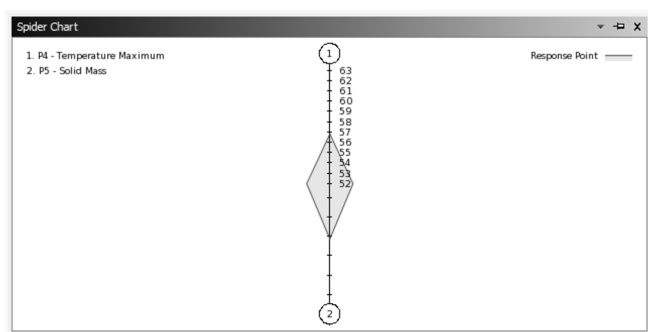


图 12-96　显示蜘蛛图

7）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

13．优化分析

1）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 C 的 C4 栏中的【Optimization】项，进入优化界面。

2）设置优化判定准则。在【Outline of Schematic C4：Optimization】窗口中选择 A3 栏中的【Objectives and Constraints】选项，然后在【Table of Schematic C4：Optimization】窗口中设置判定准则为 Minimize P4、Minimize P5，如图 12-97 所示。

Table of Schematic C4: Optimization

	A	B	C	D	E	F	G
1	Name	Parameter	Objective		Constraint		
2			Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
3	Minimize P4	P4 - Temperature Maximum	Minimize		No Constraint		
4	Minimize P5	P5 - Solid Mass	Minimize		No Constraint		
*		Select a Parameter					

图 12-97　设定优化判定准则

3）设置样本数和候选数。在【Outline of Schematic C4：Optimization】窗口中选择 A2 栏中的【Optimization】选项，然后在【Chart：Design Points Schematic C4：Optimization】窗口中设置【Number of Samples】为 15、【Maximum Number of Candidates】为 3，如图 12-98 所示。

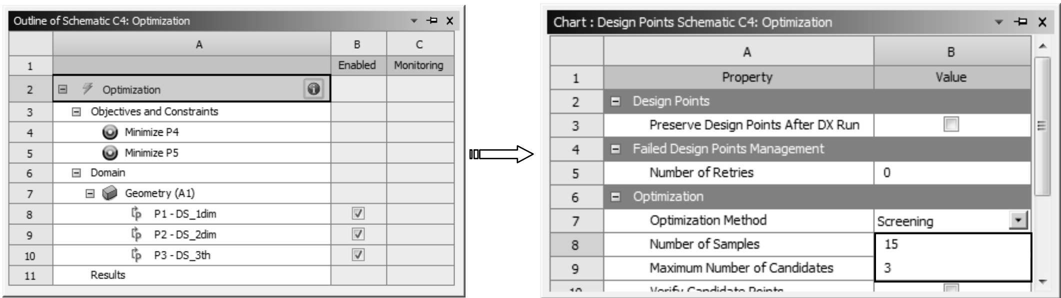


图 12-98　设置样本数和候选数

4）单击工具栏上的【Update】按钮 Update，更新计算完成后在【Table of Schematic C4：Optimization】窗口显示优化信息并显示 3 个候选设计点，如图 12-99 所示。

Table of Schematic C4: Optimization

	A	B	C	D
1	Optimization Study			
2	Minimize P5	Goal, Minimize P5 (Default importance)		
3	Minimize P4	Goal, Minimize P4 (Default importance)		
4	Optimization Method			
5	Screening	The Screening optimization method uses a simple approach based on sampling and sorting. It supports multiple objectives and constraints as well as all types of input parameters. Usually it is used for preliminary design, which may lead you to apply other methods for more refined optimization results.		
6	Configuration	Generate 15 samples and find 3 candidates.		
7	Status			
8	Candidate Points			
9		Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
10	P1 - DS_1dim	47.333	46	50
11	P2 - DS_2dim	191.33	181.33	196.33
12	P3 - DS_3th	1.6444	1.8667	2.0889
13	P4 - Temperature Maximum (C)	★ 54.854	★ 56.131	★★ 53.613
14	P5 - Solid Mass (kg)	★ 0.45758	★ 0.46729	✕ 0.56083

图 12-99　【Table of Schematic C4：Optimization】窗口

5）在【Outline of Schematic C4：Optimization】窗口中选择 A12 栏中的【Candidate Points】选项，显示 3 个候选点。在 Candidate Point1 上单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Insert as Design Point】命令，将候选点插入到设计空间，如图 12-100 所示。

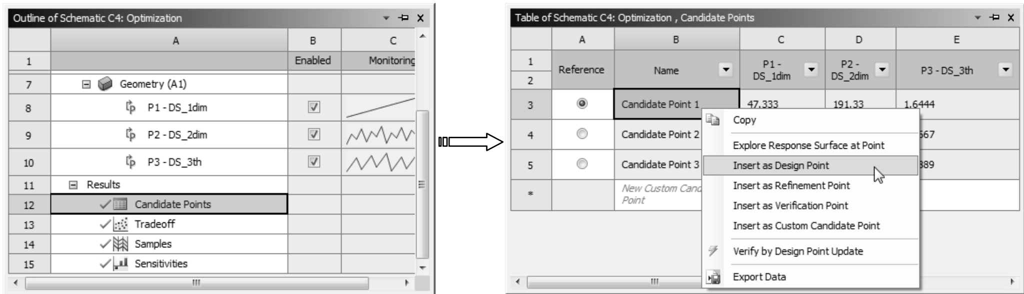


图 12-100　将候选点插入到设计空间

6）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

7）双击流程图中的【Parameters Set】选项，进入参数设置空间，在【Table of Design Points】

窗口中选中 DP1（上一步插入到设计空间的候选设计点），单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Copy inputs to Current】命令，将设计点 DP1 输入参数复制到当前设计点，如图 12-101 所示。

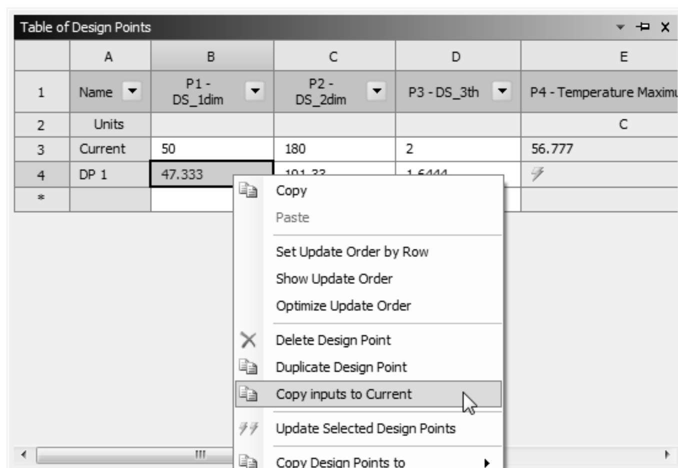


图 12-101　选择【Copy inputs to Current】命令

8）单击 Return to Project 按钮，返回 ANSYS Workbench 主界面。

9）在流程图中选中 B7 栏中的【Results】单元格，单击鼠标右键，在弹出的快捷菜单中选择【Update】命令，更新数据，如图 12-102 所示。

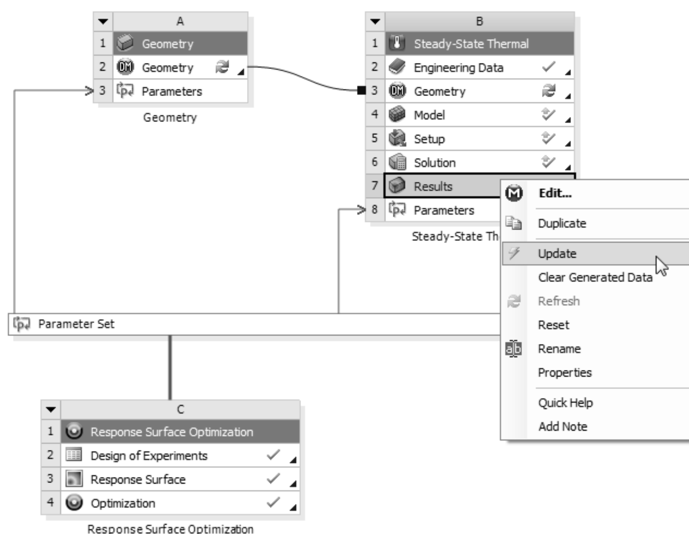


图 12-102　选择【Update】命令

10）双击【Project Schematic（项目管理区）】中项目 B 的 B4 栏的【Model】项，进入 Mechanical 界面。

11）温度分析云图。在【Outline（分析树）】中选择【Solution（B6）】节点，单击其下的【Temperature】项 Temperature，在图形窗口显示出温度分析云图，如图 12-103 所示。

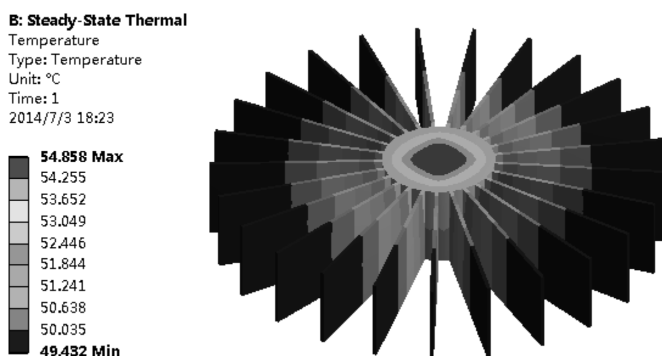


图 12-103　温度分析云图

14. 保存和退出

1）单击 Mechanical 界面右上角的【关闭】按钮，退出 Mechanical 界面，返回 ANSYS Workbench 主界面。

2）单击工具栏上的【Save Project】按钮，保存项目，然后单击右上角的【关闭】按钮退出。

12.4.4　实例总结

本节以散热器为例讲解了 ANSYS Workbench 的响应曲面分析方法和具体应用步骤，读者在学习过程中需要注意的是：响应曲面分析主要是通过图标形式动态显示输入参数和输出参数之间的关系，包括响应图、局部敏感度图、蜘蛛图等；通常，通过响应曲面分析后还要利用直接优化获得最优解。

12.5　本章小结

本章结合 3 个实例，讲解了 ANSYS Workbench 中的 Design Exploration 优化设计方法和操作步骤，包括几何建模（外部几何数据的导入）、材料赋予、网格设置和划分、边界条件的设定和求解以及后处理操作等。读者通过反复练习，将能熟练 ANSYS Workbench 中的 Design Exploration 优化设计操作方法。

参 考 文 献

[1] 黄志新，刘成柱．ANSYS Workbench 14.0 超级学习手册[M]．北京：人民邮电出版社，2013．
[2] 凌桂龙，丁金滨，温正．ANSYS Workbench 13.0 从入门到精通（配光盘）[M]．北京：清华大学出版社，2012．
[3] 高耀东，等．ANSYS Workbench 机械工程应用精华 30 例[M]．北京：电子工业出版社，2013．
[4] 许京荆．ANSYS 13.0 Workbench 数值模拟技术[M]．北京：中国水利水电出版社，2012．
[5] 李兵，何正嘉，陈雪峰．ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]．北京：清华大学出版社，2008．

ANSYS 14.5

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
服务咨询热线：010-88361066
读者购书热线：010-68326294
010-88379203
网络服务
机工官网：www.cmpbook.com
机工官博：weibo.com/cmp1952
金书网：www.golden-book.com
教育服务网：www.cmpedu.com
封面无防伪标均为盗版





机械工业出版社微信服务号

快关注我吧，
我是机工社机械科技出版

ISBN 978-7-111-48820-0 上架指导 工业技术／机械工程／机械设计
ISBN 978-7-89405-666-5(光盘) 编辑热线 (010)88379733

策划编辑◎周国萍 / 封面设计◎马精明



定价：69.00元(含1DVD)